

행사자료

양자기술 산·학·연·관 교류·소통의 場

제1차 K-퀀텀 스퀘어 미팅

2021년 12월 10일(금), 엘타워(서울)

주최 : 과학기술정보통신부

주관: 한국연구재단, 양자정보연구지원센터

K-QUANTUM

[행사개요]

- (주최) 과학기술정보통신부
- (주관) 한국연구재단, 양자정보연구지원센터
- (일시) '21.12.10.(금) 10:00 ~ 16:30
- (장소) 양재 엘타워 그레이스홀(*보조행사장 : 오르체홀)
- (참석대상) 대학·출연연 연구자, 기업 관계자 등 관련 분야에 종사하거나 관심있는 분
- (주요내용) 정부 정책·사업 설명 및 의견수렴, 양자기술 소개 및 네트워킹 행사 등

[프로그램]

시간	프로그램	세부내용
10:00~10:40('40)	행사등록	
10:40~11:00('20)	개회식	<ul style="list-style-type: none"> - 환영사 (과학기술정보통신부 1차관) - 개회사 (한국연구재단 이사장) - 유공자 시상식(과학기술정보통신부 장관 표창)
11:00~12:10('70)	[세션 1] 양자기술의 개념 및 동향 소개	<ul style="list-style-type: none"> - [발표 1] 국내 연구현황 및 연구그룹 소개(한양대 이진형 교수) - [발표 2] 양자컴퓨팅 클라우드를 활용한 국내 연구활동 소개 (양자정보연구지원센터 정연욱 센터장) - [토론 1] 주제를론
12:10~13:30('80)	오찬 및 네트워킹	
13:30~14:30('60)	[세션 2] 정부 정책/사업 설명 및 의견수렴	- 과학기술정보통신부 정책·사업 설명 및 의견수렴
14:30~15:00('30)	네트워킹(커피브레이크)	
15:00~16:30('90)	[세션3] 양자기술 발전전망 및 활용사례	<ul style="list-style-type: none"> - [발표 3] 신소재 개발을 위한 양자정보기술(KIST 김용수 박사) - [발표 4] 양자컴퓨터와 머신러닝(성균관대 박경덕 교수)

[정부 정책·사업 설명 자료]

양자기술 육성 방향 및 추진계획(안)

디지털을 넘어 **퀀텀시대**를 준비하는
양자기술 육성 방향 및 추진 계획(안)

| 2021. 12. 10.



과학기술정보통신부
Ministry of Science and ICT



Contents

목차

I. 양자기술의 개념 및 중요성	1
II. 글로벌 동향	2
III. 국내 상황 및 기회 요인	5
IV. 정책 방향	7
V. 사업 현황 및 추진 계획	9
VI. 국가 차원의 집중지원 환경 조성 계획	26

I 양자기술의 개념 및 중요성

양자기술은 미래 산업·안보의 게임체인저가 될 파괴적 혁신 기술

■ 양자 고유의 특성을 활용한 차세대 혁신기술로 미래 산업생태계의 판도를 바꿔 놓을 것으로 기대



■ 양자 컴퓨팅 기술의 발달은 현재의 디지털 암호체계를 무력화할 수 있어 안보 측면에서도 중요



오늘날 쓰이는 정보보안 암호체계

공개키(RSA) 암호체계

컴퓨터가 소인수분해에 오래 걸리는 점에 착안된 암호체계이나, 양자컴퓨터가 짧은 시간내에 소인수분해를 하게 되면 암호체계를 무력화

2,048비트 암호 해독에 걸리는 시간



VS



II 글로벌 동향

각 영역별로 기술 개발 및 초기 상용화가 진행 중

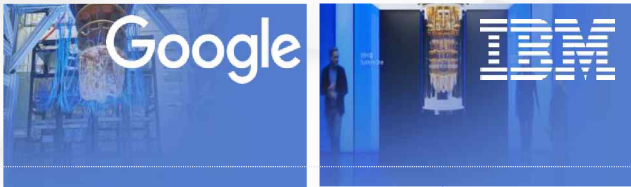
양자 컴퓨팅

기술

- '30년대 후반 본격 상용화가 예상되며 **다양한 후보* 기술 간 경쟁 중**
- 초전도, 이온트랩, 반도체 양자점 등 6종류 이상의 기술방식이 경쟁 중
- 본격 상용화 전, '30년 전후로 **중간단계(NISQ*)** 수준의 **양자컴퓨팅 기술**을 최적화·활용 예상
* Noisy Intermediate Scale Quantum

산업

- 구글, IBM 등 **글로벌 IT대기업** 중심으로 본격 개발 중이며, **클라우드** 기반으로 **일부 서비스** 제공
- IBM은 전세계 100여개 기관을 대상으로 IBM Q 네트워크를 구축·운영



양자 통신

기술

- 유선양자암호통신은 **초기 상용화** 단계며,
• 무선양자통신기술 (초근거리 및 장거리) **초기 기술 개발 진행 중**
- 더 나아가 미래에는 정보를 양자상태로 전송하는 **양자인터넷**으로 발전 전망

산업

- 테스트베드 성격의 **시범 서비스** 및 **장비** 위주의 초기 시장 형성 중
- SKT는 '18년 스위스 양자암호통신장비 업체인 IDQ(스위스) 인수



양자 센서

기술

- 기존 센서를 뛰어넘는 민감도/분해능에 대해 **실험실 수준에서 가능성 입증**
- 자기장 센서, 관성 센서, 이미징 센서
- 실제 응용이 가능할 수 있도록 SWaP-C* **최적화** 등을 위한 연구 추진 중
* 크기(Size), 무게(Weight), 전력소모(Power) 및 가격(Cost)

산업

- 대부분의 양자센서가 **실험실 단계 연구** 중이며 **항법·의료** 등 일부 분야에서 **상업적으로 적용**
- BOSCH는 네비게이션용 양자 자기장 센서 개발 중



II 글로벌 동향

미·중 간 양자기술 패권 경쟁 본격화



미국



중국



양자법 제정('18) 및 '18~'22년간 1.4조원 투자를 통해 중국 견제 및 글로벌 주도권 확보에 총력

✓ 양자법을 제정('18.12)*하고, '18~'22년간 12억 달러(1.4조원) 투자

- 백악관 직속 국가양자조정실(NQCO) 및 대통령 자문기구로 "국가양자자문위원회" 설치
- 바이든 정부는 AI, 양자 등 첨단기술 개발에 4년간 3,000억 달러 투입 발표('20.11)

✓ 국가안보핵심기술로 지정하고, 중국으로 기술 유출 통제 강화

- '18.11월 「수출통제개혁법 (ECRA)」 재개정으로 양자 관련 소재·부품 수출입 통제도 강화



세계 최대 양자연구소 설립 추진 및 '18~'22년간 17조원 지원 등 양자 굴기를 위해 적극적으로 투자 확대

✓ 중국은 양자암호통신 기술 분야에 중점 투자

- 세계 최초 양자암호통신위성(묵자호)을 발사하고 북경-비엔나 간 7,600km 양자 전송에 성공('17년), 북경-상해 간 2,000km 양자암호통신 백본망 구축('16년)

✓ 양자밸리·양자정보연구소(허페이) 설립 추진('17~)

✓ '18년 중국의 양자기술 분야 특히 출원이 미국의 2배이며, 중국과기대를 중심으로 매년 수백명의 석·박사 배출 중



II 글로벌 동향

유럽과 일본도 국가 차원에서 양자기술 경쟁에 가세

EU는 '18년부터 10년간 1.4조원을 투자하고, **최고 수준의 양자 기초기술이 산업적 성과 창출로 이어지도록 노력 중**



- ☑ 전통적으로 기초과학 강국인 유럽은 영국/독일을 중심으로 전반적인 양자기술력은 글로벌 Top수준이나 상용화 측면에 뒤쳐져 있는 상황
- ☑ '16년 “양자 선언문 (Quantum Manifesto)”을 통해 개발 로드맵을 발표하고, '18년부터 10년간 EU 회원국 중심으로 **“Quantum Flagship Program” 추진**

일본은 양자기술을 3대 국가전략기술로 지정하고, **미국 중심의 기술 블록화에 적극 동참**

☑ 초전도 기술, 슈퍼컴퓨터 등의 우위 기술을 토대로 미국·EU 등과의 기술 연대 강화

- 미국과의 기술동맹 강화를 위한 “美日 量子협력에 관한 도쿄 성명”을 발표 ('19.12), 이를 근거로 아시아 지역 최초로 日 도쿄대에 IBM 양자컴퓨팅 시스템 설치
- 최근 개최된 미·일 정상회담('21.4.16)에서 바이오, 양자, 우주 기술 등의 분야에서 협력 강화 발표


일본 |

연합뉴스 2021.4.16

“바이든-스가, 미·일 정상 회담에서 중국 견제 천명”

미·일 양국은 인공지능, 양자기술, 생명과학, 민간 우주 분야에서 연구개발 협력을 강화하고, 5G, 반도체 공급망 등에서 중국 견제에 긴밀히 협력해 나가기로...



III 국내 상황 및 기회 요인

국내 상황

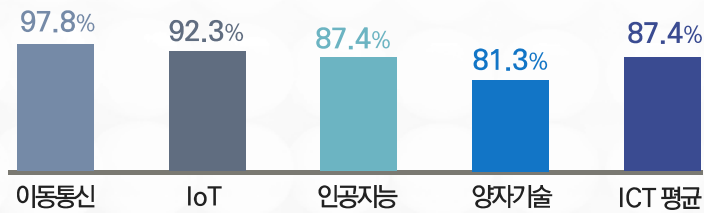
■ 우리나라는 R&D 후발국으로 15~20년 넘게 꾸준히 투자해온 선도국에 비해 기술수준이 낮고, 인력 및 인프라 등 기반이 미흡

기술 수준

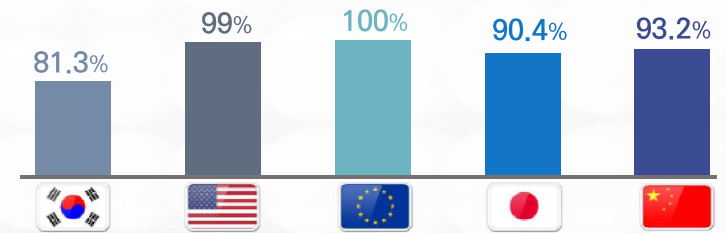
☑️ 기반기술(양자이론, 초전도, 저온물리), HW/SW 등 모든 면에서 **기술 수준이 낮은 상황**

☑️ 최선도국 대비 **81%** 수준으로 **국내 ICT 기술내 최하위**

* 양자컴퓨터 71.8%, 양자통신 84.5%, 양자센서 84.7% 수준



국내 ICT 기술 간 비교 (최선도국 100% 대비)



주요국 간 상대수준 비교 (최선도국 100% 대비)

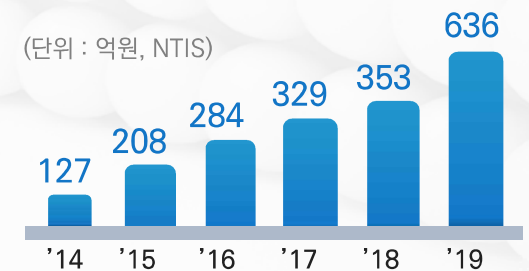
출처: 2019년 ICT 기술수준 조사(IITP)

R&D 투자

☑️ 정부 R&D 투자는 초기단계로 **정부 주도**로 추진 중이며, 전용사업을 신설한 '19년을 기점으로 크게 증가

☑️ 민간은 일부 대기업이 소규모 자체 연구 수행 및 해외 투자

- SKT는 정부 R&D 참여 후 스위스 양자통신기업인 IDQ 인수('18)를 통해 양자암호장비 상용화
- 삼성, 현대자동차 등이 미국 양자 컴퓨팅 벤처기업인 IonQ, Aliro 등에 투자



III 국내 상황 및 기회 요인

국내 상황

전문 인력

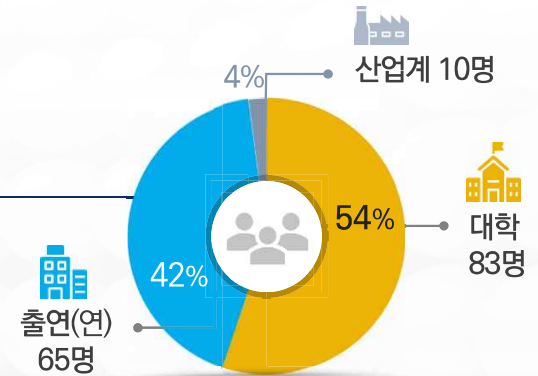
- ✓ 학문적 난이도가 높고, 국내 시장의 부재로 관련 지식과 노하우를 갖춘 특화 전문인력이 절대적으로 부족
- ✓ 현재 국내 양자 핵심연구인력은 약 150여명으로 추산



2030년 핵심인력 약 1,000명 수요 전망

- 미국 1,200명, 중국 2,000명, 일본은 500명 추산

국내 핵심연구자 현황



국제 협력

- ✓ 한-미 정상회담('21.5) 전까지 정부 간 공식 의제로 논의된 바 없으며, 인력 파견 및 네트워킹 수준의 공동연구 추진

기회 요인

- 본격 사업화 이전 단계로 지배적 기술이 정립되지 않아 추격의 기회는 열려 있는 상황
- 우리가 강점을 가지고 있는 ICT인프라, 반도체 역량을 활용하여 총력 대응한다면 추격 가능

IV 주요 정책 방향

양자기술 연구개발 투자전략 수립('21.4)

From Digital to Quantum

비전

디지털을 넘어 **퀀텀의 시대**로

목표

2030년대 양자 기술 4대 강국 진입 | **쏠 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화**

단계별 목표

Phase 1 | 2021 ~ 2024

인력양성, 요소기술 개발 등 기반 마련

Phase 2 | 2025~ 2030

학문적·산업적 활용 가능성(성공사례) 입증

Phase 3 | 2031 ~ 2035

양자기술 상용화 본격 추진

중점
추진전략

1

도전적 원천연구 강화

2

전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축

3

특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화

4

양자기술의 활용 및 산업 혁신 촉진

IV 주요 정책 방향

과학기술자문회의 산하 양자기술특별위원회 설치('21.11)

■ **민관이 함께 참여**하는 강력한 추진체계를 구축하여 양자기술·산업 발전을 위한 전략 구체화 및 핵심 추진과제 집중 추진

- ✓ 민관 공동위원장 2명 + 정부위원 8명 + 민간위원 11명 + 특별자문 1명 등 총 22명
- ✓ 4개 기술 + 2개 활용 분과와 실무위원회로 구성
- ✓ 해외에서 활발히 활동 중인 저명한 재외과학자를 “특별자문”으로 초청



■ 범부처 양자기술 육성 정책, 연구개발 전략, 활용·확산 및 산업 생태계 조성을 위한 **기획·조정 역할 수행**

■ 양자기술의 중요성 및 전망에 대한 이해도를 제고하고, 체계적 육성을 위해 **핵심 사안별 세부 전략·방안을 마련하여 이행·환류**

V

사업 현황 및 추진 계획(안)

※ 현재 사업별 세부기획 중으로 추진과정에서 변경될 수 있음

사업 체계 및 예산 현황

’21년 6개 사업 466억원에서 ’22년 9개 사업 789억원(3개 신규사업, 323억원 증)으로 대폭 확대(전용사업 기준)

※ 양자기술 전용사업 기준으로 기초연구사업(’20기준, 약 200억원) 및 출연연 고유사업(’22기준 약 200억원) 등 과제 단위 지원사업 제외

구분	사업명	사업내용	21예산	22예산	비고
원천연구	양자컴퓨팅 기술개발	양자소자, 양자시뮬레이터, 시스템·SW 요소기술 개발	9,634	11,409	’19~’23, 498억
	양자컴퓨팅 연구인프라 구축	50큐비트급 양자컴퓨팅시스템 구축·운영	-	10,000	’22~’26, 490억
	양자센서 핵심원천기술 개발	원자중력계 등 양자센서 핵심기술 개발	5,800	8,500	’19~’25, 309억
	양자암호통신 집적화 및 전송기술고도화	양자암호통신의 집적화·효율화 등 핵심기술 확보	7,300	7,600	’20~’25, 355억
	양자인터넷 핵심원천기술 개발	양자 네트워크 디바이스 및 전송 핵심기술 개발	-	7,200	’22~’26, 478억
	국가간 협력기반 조성 (양자기술 협력)	양자소자 설계·공정 등 핵심기술 확보를 위한 국제협력 추진	-	6,000	’22~’26, 470억
인프라구축	양자 연구개발생태계 조성	양자팹 구축·운영 및 양자클라우드서비스 공동활용	5,977	11,200	’20~
	양자암호통신 인프라 구축	양자암호통신 시범구축 및 산업생태계 조성	14,000	10,000	’22~’25
인력양성	과기혁신인재양성 (양자인적기반 조성)	리더급 연구역량 강화 및 신진인력 양성, 저변확대 등	3,875	7,050	’20~
합계			46,586	78,959	

중점 추진 방향

■ 집약된 연구개발을 통해 핵심기술을 빠르게 추격

- ☑ 초전도 기반으로 한국형 양자컴퓨팅시스템을 성공적으로 이끌고, 유망 플랫폼도 지속 발굴·지원하는 등 플랫폼별 전략적 지원 강화

※ 양자컴퓨팅 기술개발(범용양자컴퓨터 개발), 양자컴퓨팅 연구인프라 구축

■ 시작단계에 있는 활용 분야 성과를 조기 창출하여 경쟁력 우위 확보

- ☑ 개별 알고리즘 이론·SW 설계 연구를 확대하고, 한국형 양자컴퓨팅시스템 운영과 연계하여 통합 라이브러리 개발 지원

※ 양자컴퓨팅 기술개발(알고리즘·SW 개발), 양자컴퓨팅 연구인프라 구축

- ☑ 민관 파트너십을 통해 양자컴퓨팅 기술 활용이 유용한 문제 발굴 및 기술개발 성과 창출

※ 양자컴퓨팅 기술개발(양자시뮬레이터 개발), 혁신도전 프로젝트(양자시뮬레이터를 활용한 고부가가치 신소재 개발, '23~)

■ 국내외 협력 등을 통한 양자 핵심연구인력 양성·확보

- ☑ 국내 교수급 인력의 양자기술 역량 강화 및 신진인력 양성을 통해 현재 150명에서 '30년 1,000명 수준으로 양자 핵심연구인력 확보

※ 과기혁신인재양성(양자 인적기반 조성), 양자암호통신 인프라 구축(양자산업생태계 조성)

■ 양자기술에 특화된 세계 최고 수준의 연구 인프라 확충

- ☑ 연구용 양자소자를 손쉽게 확보하고, 양자컴퓨터를 미리 활용해 볼 수 있는 인프라 확충 등 연구하기 좋은 환경 구축

※ 양자정보과학 연구개발생태계 조성

■ 적극적 국제협력을 통한 기술블록화에 선제 대응

- ☑ 미국을 중심으로 연국, EU 등과 공동연구, 인력교류 등 협력을 강화하고, 관련 국제 표준화 활동 등에 주도적으로 참여

※ 과기혁신인재양성(양자인적기반조성), 국가간 협력기반 조성(양자기술 협력)

① 양자컴퓨팅 기술개발

■ **(범용양자컴퓨터)** 높은 범용성·신뢰도 및 큐비트 확장성을 가지는 양자소자 기반의 범용 프로세서 개발 및 장치 구현 지원(연 12억원 규모로 2년~5년(3+2) 간 지원, 지정공모)

☑ (지원현황) '19년 선정 3과제를 3년 간 지원 중

※ 지원과제 현황 : 초전도(표준연), 고체점결함(KIST), 반도체양자점(서울대)

☑ (지원계획) 계속과제 1개(또는 0개), 신규과제 2개(또는 3개) 등 총 3개 과제를 2년간 지원 예정('22년 28억원)

※ '19년 선정 3개 과제 중 초전도 과제는 별도사업(양자컴퓨팅 연구인프라 구축)으로 확대, 나머지 2개 과제는 과제간 경쟁력 방식의 단계평가를 통해 2년 추가지원(최대 1개) 여부 검토

☑ (추진일정) 계속과제 단계평가('21.12월) → 신규과제 공고('22.1월, 지정공모) → 선정평가('22.3월) → 지원과제 확정 및 연구개시('22.4.1)

■ **(양자시뮬레이터)** 양자컴퓨팅 기술을 활용해 해결 가능한 실용적 문제를 발굴하여 이에 최적화된 양자시뮬레이터 개발 및 효과 구현 지원(연 10억원 규모로 3년~4년(3+1) 간 지원, 지정공모)

☑ (지원현황) '19년 선정 2과제를 3년 간 지원 중

※ 지원과제 현황 : 원자기반 다체물리모델(표준연), 광자기반 양자머신러닝(KIST)

☑ (지원계획) 단계평가를 거쳐 계속과제 1개(또는 2개) 과제를 1년 간 지원 예정('22년 19억원)

※ '23년부터는 혁신도전 프로젝트(양자시뮬레이터를 활용한 고부가가치 신소재 개발, 기획 중)로 지원 예정

☑ (추진일정) 계속과제 단계평가('21.1월) → 계속 지원과제 확정('22.2월) → 4차년도 연구개시('22.3월) → 과제종료('23.2월)

① 양자컴퓨팅 기술개발

■ **(시스템기술)** 대규모 HW시스템에서 정보를 효율적으로 호출·처리·저장하기 위한 보조HW·아키텍처 및 시스템SW 등 개발 지원(연 3억원 규모로 2년~3년 간 지원)

- ☑ (지원현황) '19년 4개(신규4), 20년 9개(신규5, 계속4), 21년 12개(신규3, 계속9) 지원 중
- ☑ (지원계획안) 계속과제 8개, 신규과제 7개 등 총 15개 과제 지원 예정('22년 42억원)
※ '21년까지 선정된 과제는 3년, '22년 선정과제는 2년 지원 예정
- ☑ (추진일정안) 신규과제 공고('22.1월, 품목지정 자유공모) → 선정평가('22.3월) → 지원과제 확정 및 연구개시('22.4.1)

■ **(알고리즘·SW)** 고전시스템 대비 양자이점을 실현할 수 있는 다양한 양자알고리즘 연구 및 응용SW 개발 지원(연 2억원 규모로 2년~3년 간 지원)

- ☑ (지원현황) '19년 4개(신규4), 20년 12개(신규8, 계속4), 21년 14개(신규2, 계속12) 지원 중
- ☑ (지원계획안) 계속과제 10개, 신규과제 5개 등 총 15개 과제 지원 예정('22년 28억원)
※ '21년까지 선정된 과제는 3년, '22년 선정과제는 2년 지원 예정
- ☑ (추진일정안) 신규과제 공고('22.1월, 품목지정 자유공모) → 선정평가('22.3월) → 지원과제 확정 및 연구개시('22.4.1)

② 양자컴퓨팅 연구인프라 구축

■ 사업 내용

- 초전도 기반의 50큐비트급 양자컴퓨터 핵심 요소기술 확보 및 시스템 구축
 ※ 50큐비트급 시스템 구축에 필요한 설계·제어 및 SW 기술 등 확보, 소자·시스템·SW 등 확보한 요소기술들을 통합·최적화한 시스템 구축
- 양자컴퓨팅시스템 시범 운영 및 클라우드·테스트베드 서비스 제공
 ※ 구축된 양자컴퓨팅시스템 구동 및 오류 보완 등을 통해 기술·시스템 최적화, 국내 연구자가 고급제어까지 자유롭게 접근하여 활용 가능한 클라우드·테스트베드 서비스 제공
- 양자가상머신(에뮬레이터) 개발·구축 및 서비스
 ※ 큐비트 제어 신호를 포함하고 큐비트 오류모델 분석을 가능하게 하는 양자컴퓨터 시스템 에뮬레이터를 개발·구축하고, 외부 서비스 제공

■ 추진 방향

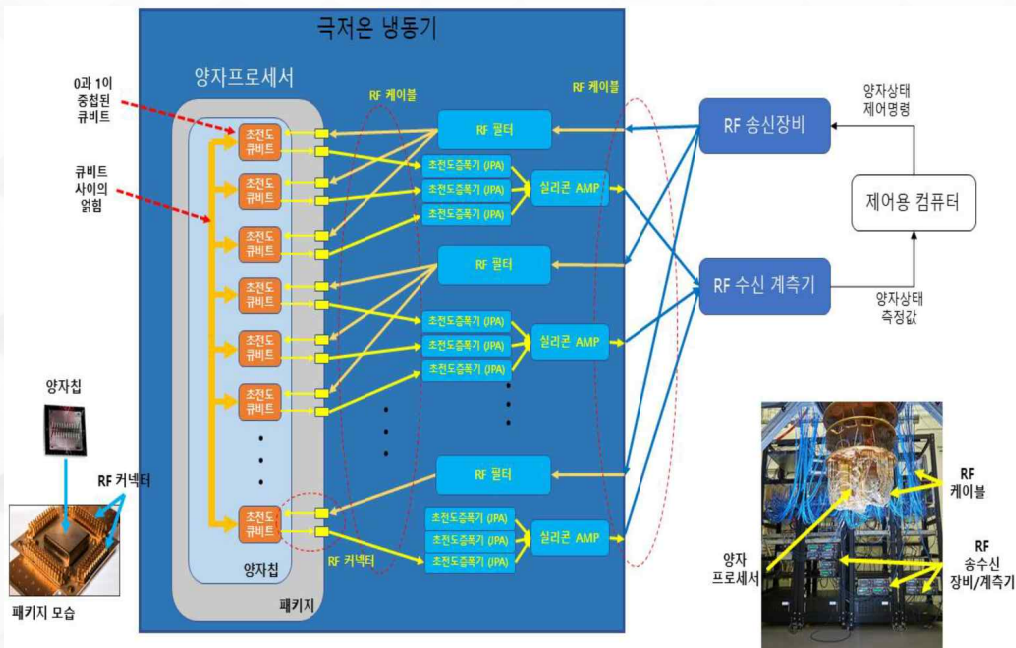
- 기존 연구그룹*과 출연연, 물리·화학, 전기·전자, 컴퓨터, 재료 분야 전문가·기관 등이 참여하는 사업단을 구성하여 산학연 역량 총 결집
 * 확장성 있는 5큐비트급 시스템 개발('19~'21, 표준연·성균관대·서울대·고려대·연세대·경북대·UNIST 등)
- 국내 관련 장비·부품 기업, 클라우드 서비스 기업(네이버, 카카오 등) 등을 적극 참여시켜 기술사업화 및 양자기업 육성
 ※클라우드 서비스 위탁 등 일정기간 운영 후 시스템 이관 등을 검토
- 미국 NIST, MIT, 버클리대, 시카고대, 위스콘신대 등 관련 역량을 보유한 해외기관과 기술협력 추진

② 양자컴퓨팅 연구인프라 구축

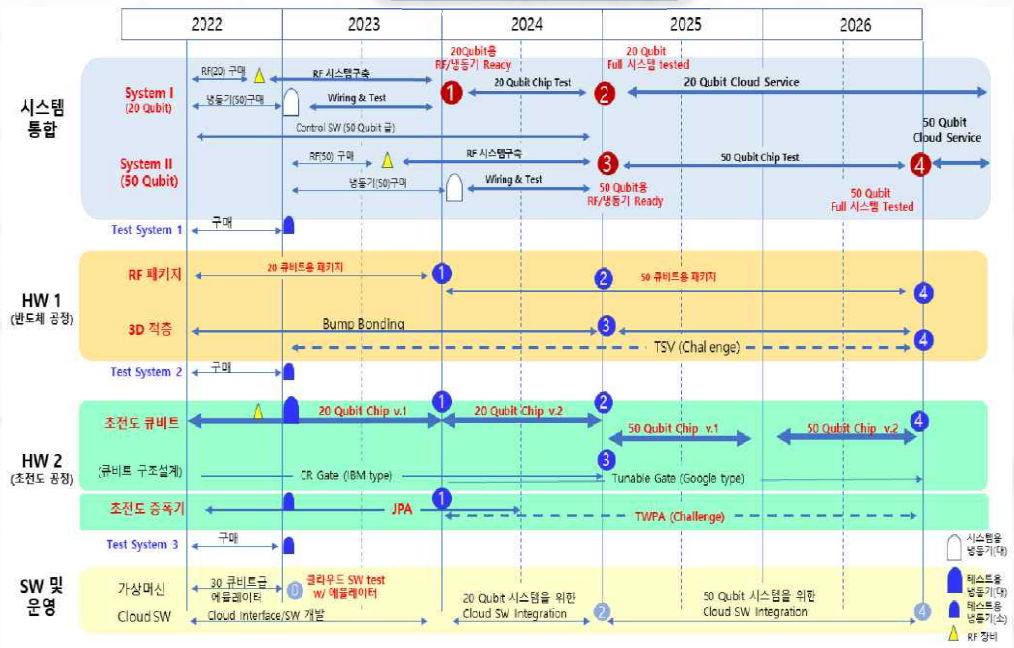
추진 일정(안)

- ☑ 사업 기본계획 수립('21.12월) → 사업단 지정 공고('22.1월) → 사업단 구성(~'22.3) → 1단계 사업(~'24, 20큐비트급 시스템 운영 개시) → 2단계 사업('25~'26, 50큐비트까지 확장)

시스템 개념 및 구조



주요 마일스톤(안)



③ 국가간 협력기반 조성(양자기술 협력)

※ 현재 사업 세부기획 중으로 아래 내용은 대안 중 하나이며, 기본계획 수립 과정에서 변경될 수 있음

■ 사업 목표

- ☑ 양자기술 선도국과의 전략적 국제협력을 통해 핵심 기술 및 역량을 빠르게 확보하여 우리나라 기술 경쟁력을 획기적으로 제고

■ 사업 내용 및 추진방안(안)

- ☑ 해외 핵심권역에 양자기술 국제협력의 가교 역할을 하는 정보제공 거점으로서 양자기술 협력센터 설치(연 5억원 규모로 5년간 지원)
 - (기능·역할) 해당 권역내 공동연구센터 지원 및 관리, 새로운 협력 분야/기관 탐색/발굴, 현지정보 수집/제공 등
 - (설치 규모) 전략적 중요성, 정상회담 후속조치 등을 감안, '22년에 미국에 우선 설치 후 다른 권역으로 확대 필요성 검토
 - (추진 방안) 연구재단 한-미 과학협력센터, ETRI 미주기술혁신센터 등 현재 운영 중인 협력센터 지정을 우선 검토
- ☑ 실질적으로 공동연구를 수행하는 양자기술 세부분야별 공동연구센터 설치(센터당 연 5~10억원 규모로 5년 간 지원)
 - (기능·역할) 양자기술 중 국내 독자개발 시 난이도가 높고 오랜 시간이 걸리는 핵심기술별로 국내기관이 해외 우수기관과 공동연구센터를 구축(해외 현지랩 운영 등)하여 협력연구 추진
 - (설치 규모) '22년에 미국 4~5개, 유럽 2~3개 등 검토
 - (추진 방안) 자체 수요조사 등을 통한 협력 기술 및 해외기관 발굴(~'21.12) → 대표단 파견 등 해외 협의(~'22.3) → 과제 공모 공고('22.4) → 선정평가('22.5) → 지원과제 확정 및 공동연구센터 운영 개시('22.6)

④ 과학기술혁신인재양성(양자정보과학 인적기반 조성)

리더급 연구역량 강화

■ **(연구혁신형)** 양자정보과학 선도국인 미국 등과의 국제공동연구를 통해 국내 교수급 연구자의 미래 연구주제 발굴 및 연구노하우 축적 등 연구역량 강화 지원(양국 정부가 자국 연구자에게 과제당 연 1억원씩 2~3년간 매칭 지원)

- ☑ (지원현황) 미공군연구소와 매칭하여 '20년 3개(신규3), 21년 6개(신규3, 계속3) 지원 중 ※ '20년 선정과제는 2년, '21년 선정과제는 3년 지원
- ☑ (지원계획안) 계속과제 6개, 신규과제 3개 등 총 9개 과제 지원 예정('22년 6억원)
- ☑ (추진일정안) 수요국가 발굴·협약(~'22.3월) → 신규과제 공고('22.4월, 자유공모) → 선정평가(~'22.6월) → 지원과제 확정 및 연구개시('22.7.1)

■ **(체질강화형)** 관련 연구를 선도하는 해외 기관 연구자가 참여하는 “양자컴퓨팅 국제공동연구단” 구성·운영을 통한 인력교류 중심 공동연구 및 연구장비 공동활용 등 다양한 연구역량 강화활동 지원(과제당 연 3억원씩 3년간 지원)

- ☑ (지원현황) '20년 3개(신규3), 21년 5개(신규2, 계속3) 지원 중
- ☑ (지원계획안) 계속과제 5개, 신규과제 2개 등 총 7개 과제 지원 예정('22년 18억원)
- ☑ (추진일정안) 신규과제 공고('22.1월, 자유공모) → 선정평가('22.3월) → 지원과제 확정 및 연구개시('22.4.1)

④ 과학기술혁신인재양성(양자정보과학 인적기반 조성)

신진인력 양성

■ (해외연수) 석·박사, 포스닥 대상으로 국내외 우수 대학·기업·연구소의 관련 연구프로젝트 참여 및 전문화된 교육과정 제공(포스닥 2년, 석박사 1년, 석사 2~4개월 등, 양자정보연구지원센터 수행)

- ☑ (지원현황) '20년 4억원, 8명 → '21년 10명, 40명 수준 지원 중
- ☑ (지원계획안) 21억원, 70명 수준 지원 예정
- ☑ (추진일정안) 상하반기 정기 모집(1월·7월, 필요시 추가선발 가능) → 선발(모집 후 1개월 내) → 연수 실시(선정후 6개월 내)

■ (양성센터) 국내 대학(원)이 연합해 석·박사생에게 이론·실습 프로젝트를 통합 제공하는 학제간 융합교육과정 신설 지원 (연 10~40억원 수준으로 9년 간(5+2+2) 지원, 잠정)

- ☑ (지원계획안) '22년 1개 센터, 10억원
- ☑ (추진일정안) 신규과제 공고('22.1월, 지정공모) → 선정평가('22.3월) → 지원센터 확정 및 운영개시('22.4.1)

대학원 교육과정(안)

- (구성) 국내 대학(원)의 관련 연구실(lab), 국내외 연구소·기업 등이 참여하는 컨소시엄 형태
- (교육과정) 이론·실습 교육 및 프로젝트 수행, 국내외 인턴쉽 등이 통합된 4년 과정으로 운영
- (인력배출) 연간 30명 이상의 박사급 인력 배출

④ 과학기술혁신인재양성(양자정보과학 인적기반 조성)

■ (미래인재 유입 촉진) 초·중·고, 대학생, 재직자 등 일반인 대상으로 양자정보과학 이해도 제고 및 관심 유도를 위한 맞춤형 교육프로그램 운영 지원(양자정보연구지원센터 수행)

- ☑ (수행현황) 양자정보 강의 및 실습(20회, 765명), 과학고 특강(7회, 430명), 교육커리큘럼 개발·운영(524명) 등
- ☑ (지원계획안) 8억원 수준 지원 예정
- ☑ (추진일정안) 교육프로그램 등 상시 운영

■ (저변확대 등) 양자커뮤니티 육성 및 문화행사 개최, 정보시스템 구축·운영, 교육·홍보 콘텐츠 개발·활용 등 추진 지원(양자정보연구지원센터, 양자정보과학기술연구회 수행)

- ☑ (수행현황) 양자기술 백서 발간, 양자정보주간 개최('20~), 양자정보종합포털 운영 등
- ☑ (지원계획안) 7억원 수준 지원 예정
- ☑ (추진일정안) 2022양자정보주간 개최 등

⑤ 양자정보과학 연구개발생태계 조성

■ (양자소자 제작지원) 기존 반도체 클린룸에서 하기 어려운 양자소자 공정에 대한 전용 설비 구축·운영 및 나노팹 장비 연계 등을 지원(양자정보연구지원센터 수행)

- ☑ (수행현황) 양자정보연구지원센터-한국나노기술원 MoU 체결('21.1), 양자팹 클린룸 완공('21.5월) 등
- ☑ (지원계획안) 장비 구축비 등 92억원 수준 지원 예정
- ☑ (추진일정안) 주요 장비 구축 완료 후 파운드리 서비스 개시('22.말~)



■ (양자클라우드서비스 활용지원) IBM, 아마존, IonQ 등 연구용 양자컴퓨팅 클라우드 서비스의 국내 공동활용체계 구축·운영 지원(양자정보연구지원센터 수행)

- ☑ (수행현황) AWS('20.12), IONQ('21.2), IBM('21.5) 클라우드 서비스 개시
- ☑ (지원계획안) 20억원 수준 지원 예정
- ☑ (추진일정안) IBM 클라우드 참여기관 재선정 및 지원('22.3)

⑥ 양자센서 핵심원천기술 개발

사업기간/예산

'19.04. ~ '25.12. / 85억원('22년)

주요 내용

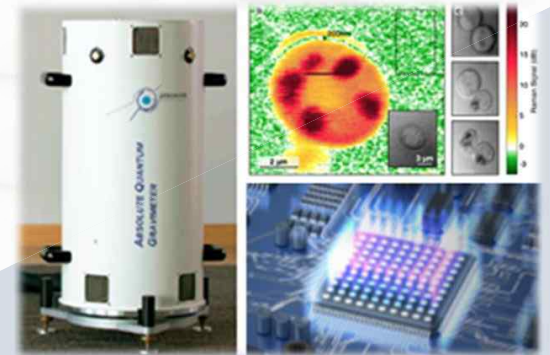
차세대 ICT 먹거리 확보를 위해 ① 이동형 고감도 양자 중력계, 고스트 이미지 센싱 시스템 개발 등 국가전략 기술 확보, ② 국내 첨단산업(반도체, 의료 등)에 활용 가능한 초정밀 양자 센싱 시스템 개발, ③ 공통활용 가능한 양자센서 기반기술 (고효율 단일광자, 무진동 극저온 냉각기 등) 경쟁력 확보 등을 추진

추진 일정(안)

(계속과제, 5개, '19.4~ '22.12) 양자센서 핵심원천 기술개발
(신규과제, 3개, '22.4~'25.12) 양자센서 산업응용 기술개발

기대 효과

양자센서 원천기술의 선도국-국내 간 기술격차를 빠르게 축소하고,
첨단산업 내 조기 활용을 통해 양자센서 R&D 생태계 활성화 촉진



⑦ 양자암호통신 집적화 및 전송기술 고도화

사업기간/예산

'20.04. ~ '25.12. / 76억원('22년)

주요 내용

양자암호통신 집적화 및 상호운용성을 위한 ① 소형 집적화 칩 개발, ② 이기종 벤더 간 호환성 제공을 위한 인터페이스 개발 ③ 양자암호통신 전송기술 고도화에 필요한 송수신 핵심부품(단일 광자 발생기·수신기, 얽힘 광자 발생기) 등 기술개발 추진

추진 일정(안)

(계속과제, 7개, '20.4~ '25.12) 양자암호통신 집적화 및 상호운용성 기술개발과 양자암호통신 전송기술 고도화 지속

기대 효과

양자암호 기술의 상용화 기술 개발과 양자전송 기술에 대한 핵심 기술 확보로 국내 양자통신 산업 분야의 글로벌 주도권 확보에 기여



⑧ 양자인터넷 핵심원천기술개발사업

사업기간/예산

'22.04. ~ '26.12. / 72억원('22년)

주요 내용

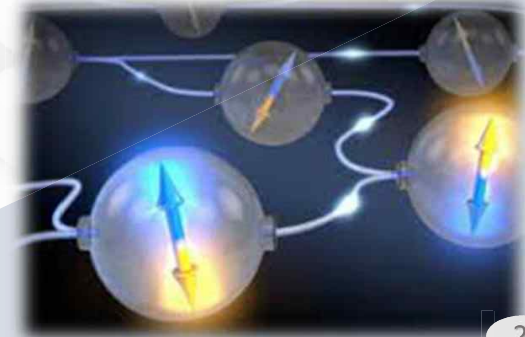
초기 양자인터넷 핵심 부품인 양자메모리를 다양한 플랫폼 기반으로 개발하고,
원거리 유선 양자중계기, 경량형 무선 양자 중계기 등 양자정보 전송에 필요한 핵심 원천기술을 확보

추진 일정(안)

(신규과제, 5개, '22~ '26년) ('22.1월) 사업 공고 ▶ ('22.2~3월) 선정평가 ▶ ('22.4월) 사업착수

기대 효과

양자기기 간 연결을 위한 양자인터넷의 핵심기술 확보



⑨ 양자암호통신 인프라 구축(양자암호통신 시범 구축)

사업기간/예산

'20.01 ~ '22.12. / 70억원('22년)

주요 내용

보안성이 중요한 공공분야, 개인정보 및 산업 기밀 보호가 필요한 민간분야에 대해 양자암호통신시범망 구축을 통해 ①보안성·안전성 검증 및 ②레퍼런스 발굴 등으로 초기시장 창출

추진 일정(안)

(3월)사업 공고 ▶ (5월)사업 착수 ▶ (8월) 중간보고 ▶ (10월) 현장점검 ▶ (12월) 최종결과보고

기대 효과

양자암호통신 레퍼런스 확보로 네트워크의 보안성 증대에 따른 데이터 활용 확대, 헬스케어 분야와 스마트공장 확산 등 초기 新시장 창출



⑨ 양자암호통신 인프라 구축(양자산업생태계 조성)

사업기간/예산

'22.01 ~ / 30억원('22년)

주요 내용

미래 양자 산업 성장을 위한 글로벌 협력강화, 산업체 연계 인력양성, 기술사업화, 소재·부품 활용지원 등으로 양자 산업 활성화 기반조성

추진 일정(안)

(3월)사업 공고 ▶ (5월)사업 착수 ▶ (8월) 중간보고 ▶ (10월) 현장점검 ▶ (12월) 최종결과보고

기대 효과

양자 산업 활성화를 강화하고, 꾸준한 인력양성으로 2030년대 세계 4대 양자 강국에 진입을 위한 기반 마련



VI 국가 차원의 집중지원 환경 조성 방향(안)

※ 세부 추진과정에서 변경될 수 있음

제 도

- 첨단전략기술육성법, 개별법 제정 등을 통해 중점 육성기반 마련

※ 양자물질/소자, 양자정보 등 광범위한 양자기술 연구·산업 분야 전반을 포괄할 수 있도록 법의 목적, 정의, 육성체계, 자원구조 등을 다각적으로 검토

예 산

- 투자 확대 및 전략성 강화를 위해 중장기 기술 로드맵에 기반한 대형 R&D 사업 기획 추진(연내 착수)

국제협력

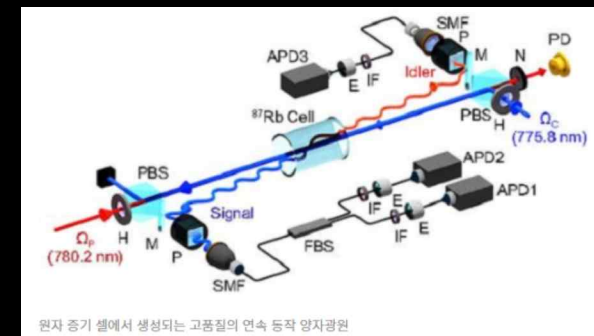
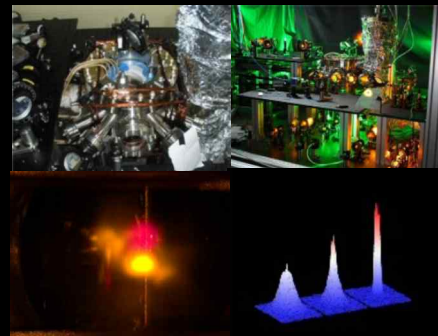
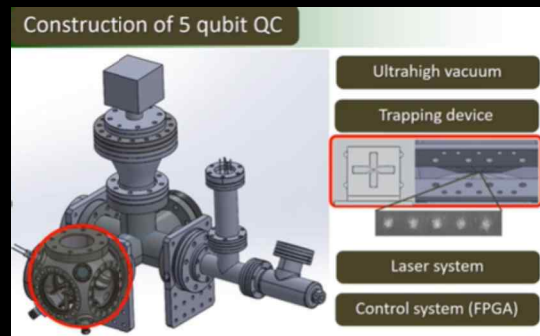
- 한-미 정부부처 간 양자기술 협력 MoU를 체결('22.상 목표)하고, 공동연구 확대 등 추진
- 국내외 전문가 간 기술동향 및 인적네트워크 구축을 위한 국제 컨퍼런스·워크숍 등 인적교류 행사 확대

[발표 1]

양자정보분야 국내 연구현황

- 이진형 교수 (한양대학교 물리학과) -

양자정보분야 국내 연구 현황



이진형

한양대 물리학과

차례

* 양자 기술 분야

* 대학 연구현황

* 정출연 연구현황

* 양자정보 국내 커뮤니티

양자정보 기술 분야

범용 양자 컴퓨팅

양자 시뮬레이팅 및 양자 머신러닝

양자 센싱 및 이미징

양자 통신 및 암호

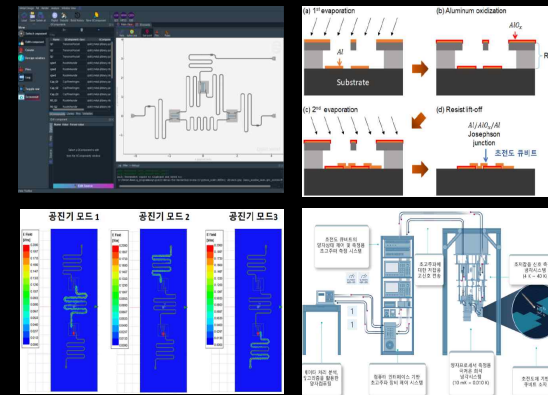
양자정보 기반기술

범용 양자 컴퓨팅

* 양자 비트 (큐비트) 실현

- * 초전도 소자
- * 이온 트랩 소자
- * NV 중심 소자
- * 양자점 소자

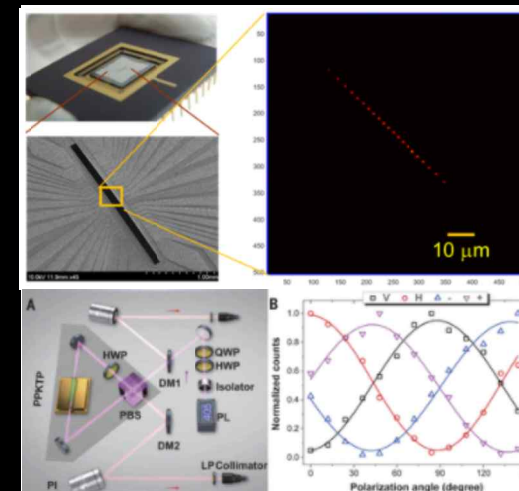
초전도 소자



* 제어 및 구동

- * 소자 제어
- * 양자 알고리즘
- * 양자컴퓨팅 구조 설계
- * emulator
고전 컴퓨터로 양자 컴퓨터 흉내

이온트랩 소자



양자 시뮬레이팅 및 양자 머신러닝

* 특수 목적 양자 컴퓨팅

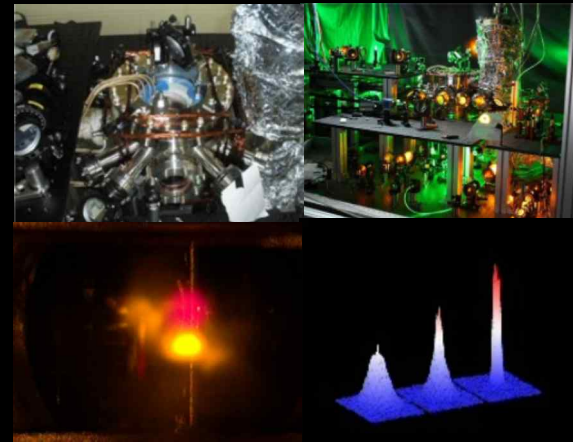
* 구현

- * 중성 원자/분자
- * 광자 및 광학
- * 알고리즘

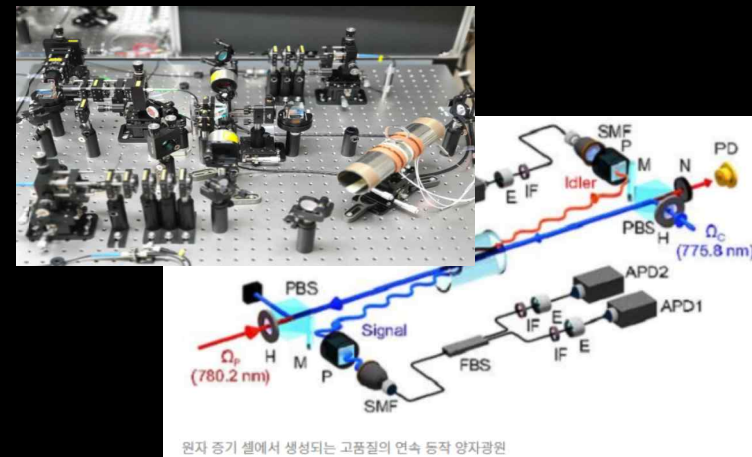
* 활용

- * 양자 물질/소재 계산
- * 신물질/신약 개발에 활용
- * 교통/물류 등 난제 해결

중성원자 및 분자



광자 및 광학

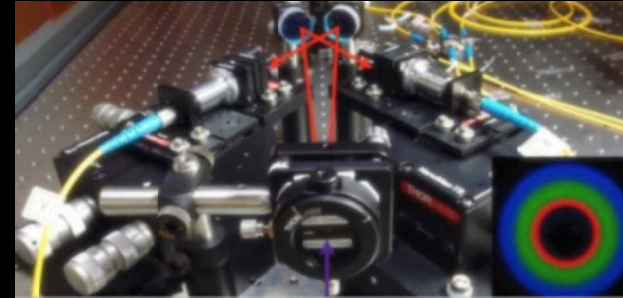


원자 증기 셀에서 생성되는 고품질의 연속 동작 양자광원

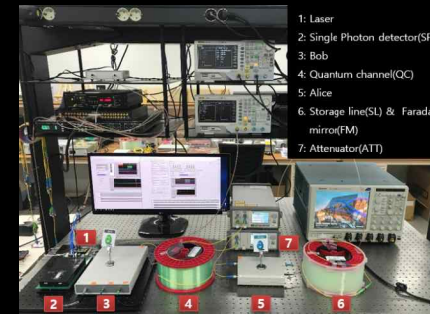
양자 센싱 및 이미징 / 통신 및 암호 / 기반 기술

* 양자 센싱 및 이미징

- * 굴절률, 자기장, 전기장, 중력장 등등

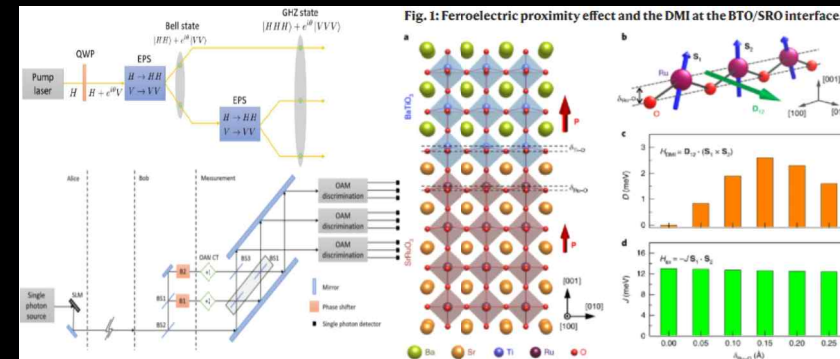


* 양자 통신 및 암호



* 양자정보 기반 기술

- * 생성/연산/측정 제어 기술
- * 양자정보 이론
- 양자 특성 규명
- 양자 컴퓨팅 및 통신 구조 설계



기업 연구 현황

* 통신 3사 - SKT, KT, LG 유플러스

- * 양자암호통신 기술 개발
- * 양자난수생성기(QRNG), 암호키분배(QKD)
- * 양자내성암호 보안



* LG 전자

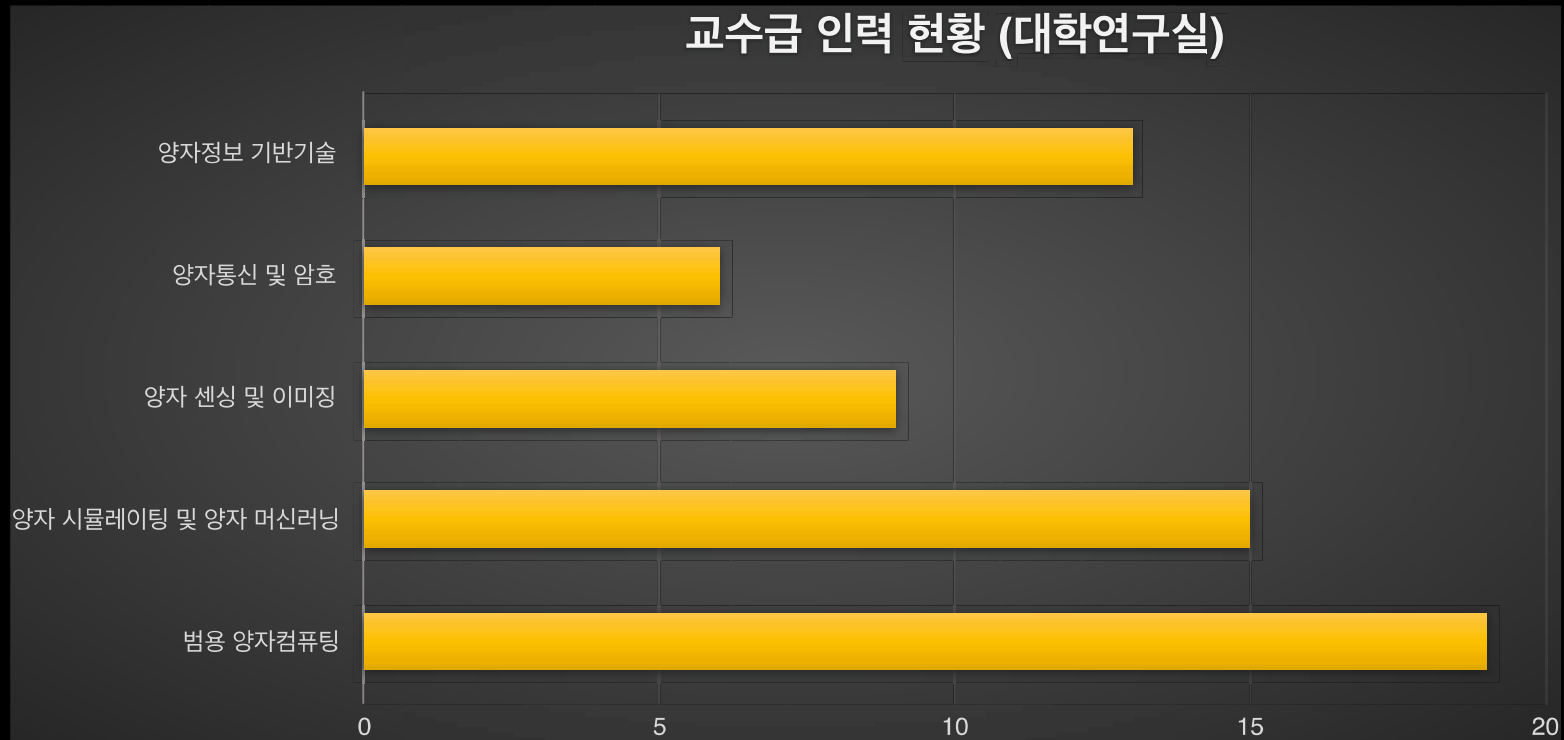
- * 네덜란드 큐앤코(Qu&Co)와 양자 시뮬레이터 개발 연구 협약

* 삼성 전자

- * 양자컴퓨팅 연구개발 (종합기술원)
- * 해외 기업인 IonQ, 이스라엘 퀴텀 머신 등 투자

* 기타 - 현대자동차, SK하이닉스, 포스코, 한국전력 등

대학 — 분야별 연구현황



대학 — 분야별 연구현황

연구분야	연구자 (가나다 순)			
범용 양자컴퓨팅	초전도 소자	도**(GIST), 문**(연세대), 정**(성균관대)	소자 제어	심**(포항공대)
	이온 트랩 소자	김**(성균관대), 김**(서울대), 이**(포항공대), 최**(이화여대)	알고리즘	김**(경희대), 이**(경희대)
	NV-중심 소자	이**(고려대), 이**(GIST),	기반 이론	정**(서울대), 최**(고려대)
	양자점 소자	김**(서울대), 김**(UNIST), 유**(KAIST)	emulator	노**(연세대), 윤**(한양대), 이**(서울대)
양자 시뮬레이팅 및 양자 머신러닝	중성 원자/분자	박**(포항공대), 신**(서울대), 안**(서울대), 안**(KAIST), 조**(고려대), 채**(고려대), 최**(KAIST)	알고리즘	이**(한양대), 허**(성균관대)
	광자 및 광학	라**(KAIST), 문**(부산대), 손**(KAIST), 조**(연세대)	양자 머신러닝	노**(연세대), 박**(성균관대), 이**(KAIST), 이**(한양대),
양자 센싱 및 이미징	김**(포항공대), 문**(부산대), 윤**(고려대), 안**(서울대), 이**(한양대), 이**(고려대), 이**(포항공대), 이**(GIST), 이**(한양대), 조**(KAIST), 함**(GIST)			
양자통신 및 암호	김**(포항공대), 김**(서울대), 라**(KAIST), 문**(부산대), 배**(KAIST), 이**(KAIST), 조**(연세대), 함**(GIST), 황**(전남대), 허**(KAIST)			
양자정보 기반기술	권**(한양대), 김**(포항공대), 라**(KAIST), 배**(KAIST), 손**(서강대), 심**(KAIST), 이**(경희대), 이**(한양대), 정**(서울대), 정**(서울대), 조**(연세대), 최**(고려대), 한**(성균관대)			

대학 — 연구 센터

- * 인공지능 양자컴퓨팅 IT 인력양성 연구센터,
KAIST ITRC (이준구 교수)
- * 양자센서 연구센터,
부산대 ITRC (문한섭 교수)
- * 확장형 양자컴퓨터 기술융합 플랫폼 센터,
포항공대 ERC (심재윤 교수)

대학 — 범용 양자컴퓨팅 소자

초전도 소자

The image shows the fabrication process of superconducting qubits in four stages: (a) 1st evaporation of Al, (b) Aluminum oxidation to Al₂O₃, (c) 2nd evaporation of Al/AlO_x/Al, and (d) Resist lift-off. It also includes a schematic of a Josephson junction and a photograph of the resulting qubit chip.

공진기 모드 1, 공진기 모드 2, 공진기 모드 3

초전도 큐비트의 양자상태 측정 및 측정용 초고주파 측정 시스템

초전도 큐비트 양자 상태 측정용 초고주파 측정 시스템 (4K ~ 400K)

초전도 큐비트 양자 상태 측정용 초고주파 측정 시스템 (4K ~ 400K)

초전도 큐비트 양자 상태 측정용 초고주파 측정 시스템 (4K ~ 400K)

이온트랩 소자

The image illustrates the construction of a 5-qubit quantum circuit. It includes a photograph of the chip, a scanning electron microscope (SEM) image with a 10 μm scale bar, and a schematic of the trapping device. The system components are listed as: Ultrahigh vacuum, Trapping device, Laser system, and Control system (FPGA). A graph shows normalized counts versus polarization angle (degree), and a photograph shows the laser system.

Construction of 5 qubit QC

Ultrahigh vacuum

Trapping device

Laser system

Control system (FPGA)

Normalized counts

Polarization angle (degree)

NV-중심 / 양자점 소자

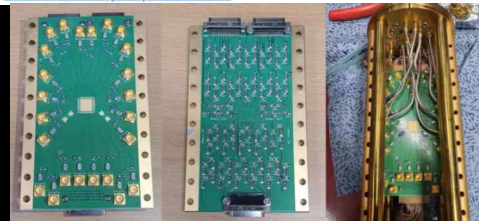
The image shows the structure of NV-center and quantum dot spin qubits. It includes a schematic of a quantum dot spin qubit with a 1 μm scale bar, a photograph of a defect spin qubit with a 5 μm scale bar, and a graph of normalized counts versus polarization angle (degree).

Quantum dot spin qubits - more

Defect spin qubits - more

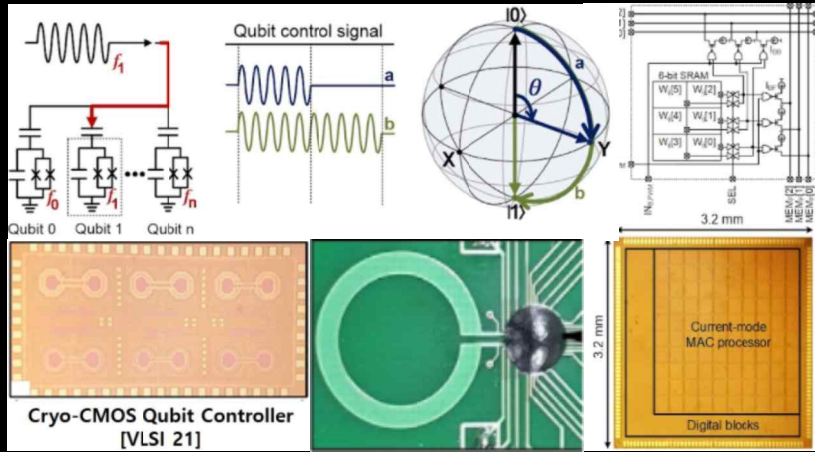
Normalized counts

Polarization angle (degree)

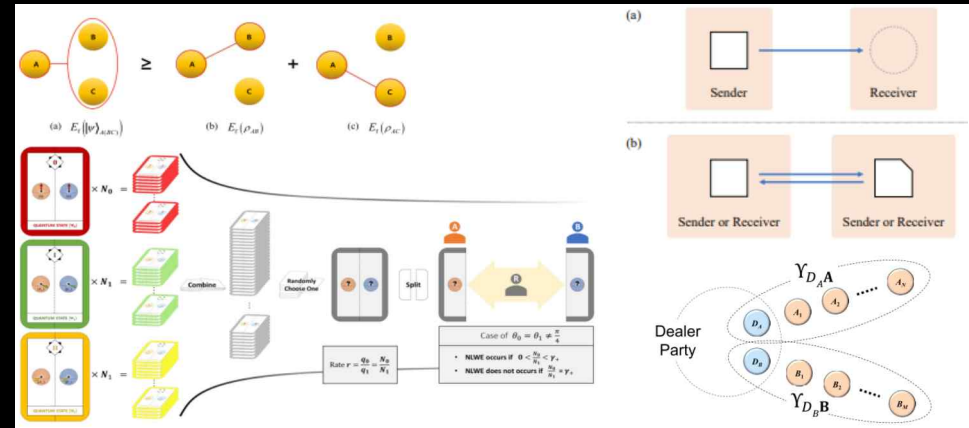


대학 — 범용 양자컴퓨팅 기타

소자제어



알고리즘

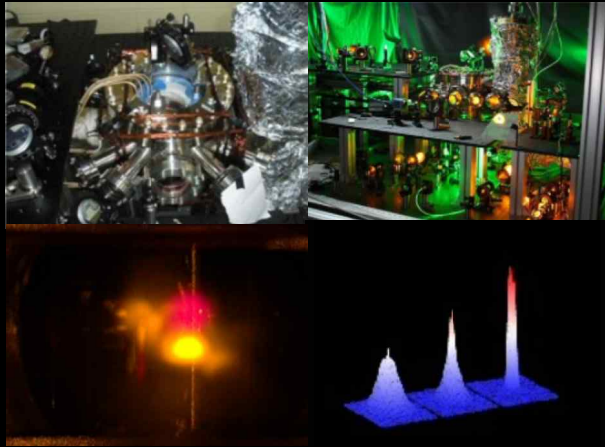


emulator

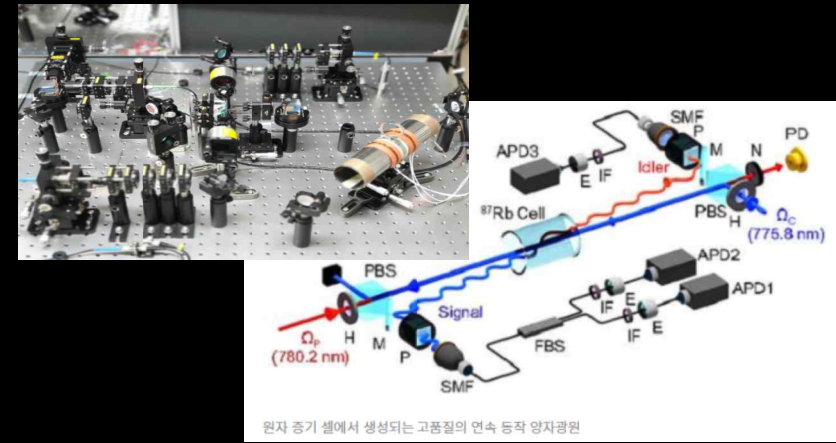


대학 — 양자 시뮬레이팅 및 양자 머신러닝

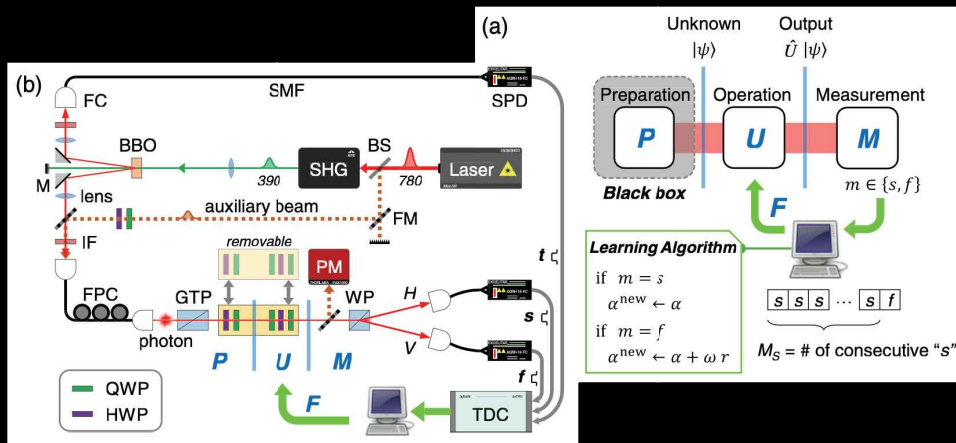
중성원자 및 분자



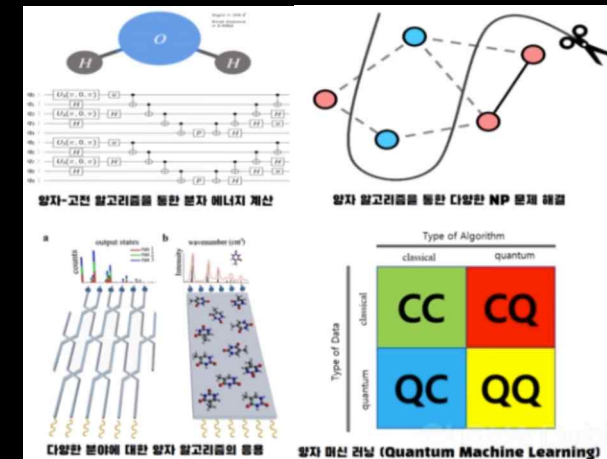
광자 및 광학



양자 머신러닝

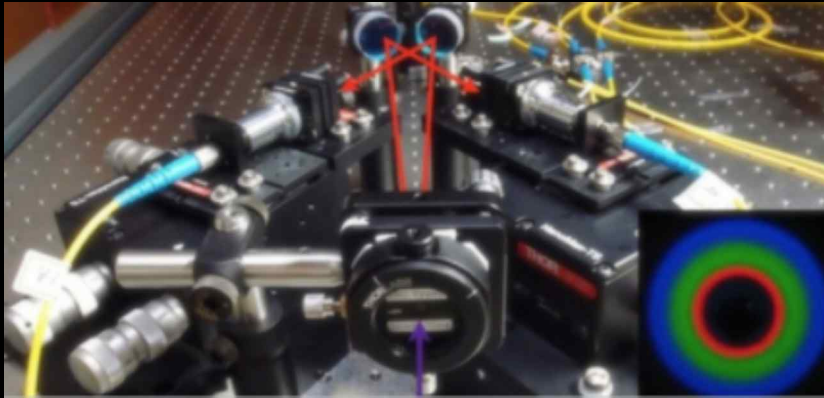


알고리즘

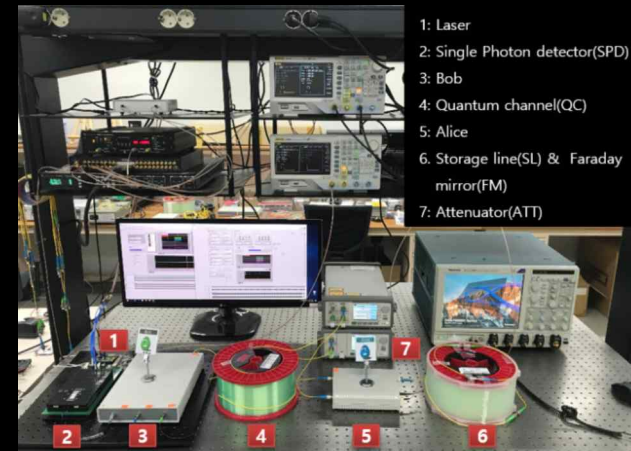


대학 — 양자센싱 및 이미징 / 양자 통신 및 암호 / 양자정보 기반기술

양자 센싱 및 이미징

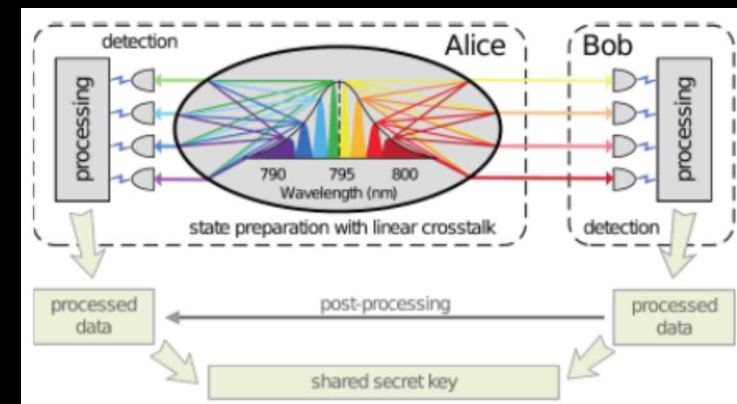
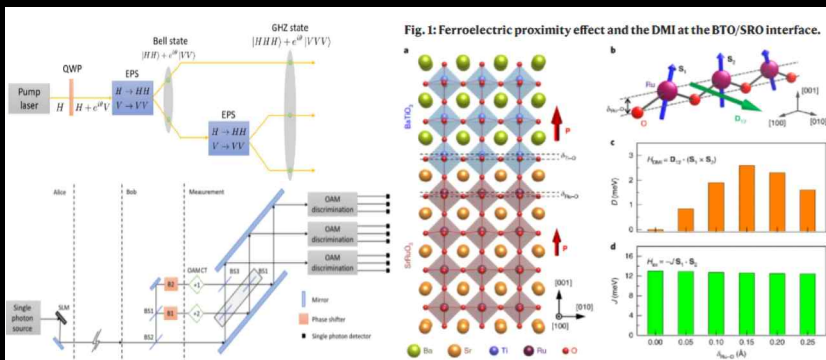


양자 통신 및 암호



- 1: Laser
- 2: Single Photon detector (SPD)
- 3: Bob
- 4: Quantum channel (QC)
- 5: Alice
- 6: Storage line (SL) & Faraday mirror (FM)
- 7: Attenuator (ATT)

양자정보 기반기술



정출연 — 연구현황

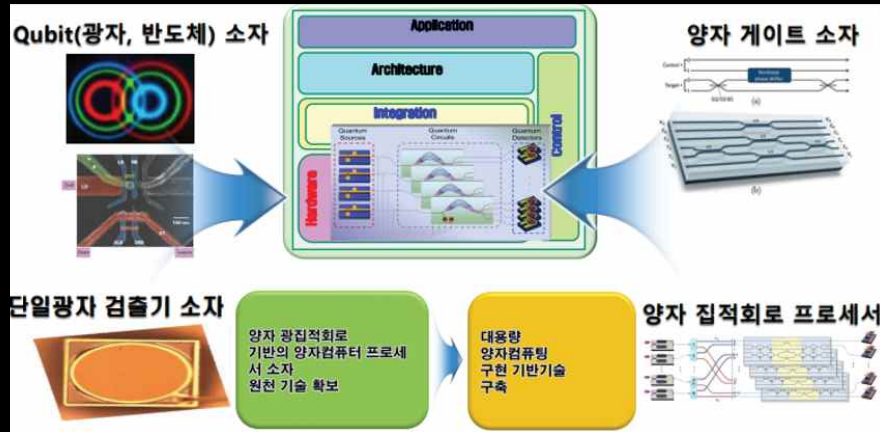
- * **KRISS** 양자기술연구소 (박희수 소장)
- * **KIST** 양자정보연구단 (한상욱 단장)
- * **ETRI** 양자기술연구단 (박성수 단장)
- * 국가보안기술연구소 (장진각 실장)

- * **KIAS** 계산과학부 (김재완 교수)
- * **KISTI** 슈퍼컴퓨팅응용센터 (류훈 박사)

정출연 — 분야별 연구현황

연구분야	연구소 (알파벳 순)			
범용 양자컴퓨팅	초전도 소자	KRISS	소자 제어	ETRI, KIST, KRISS
	이온 트랩 소자		알고리즘	
	NV-중심 소자	KIST	기반 이론	KISTI
	양자점 소자	ETRI	emulator	ETRI, KISTI
양자 시뮬레이팅 및 양자 머신러닝	중성 원자/분자	KRISS	알고리즘	ETRI, KIAS, KIST
	광자 및 광학	KIST, KRISS	양자 머신러닝	ETRI, KIST
양자 센싱 및 이미징	ETRI, KIST, KRISS			
양자통신 및 암호	ETRI, KIST, 국보연			
양자정보 기반기술	KIAS, KIST, KISTI, KRISS			

광집적회로 양자프로세서



양자 광집적회로 프로세서 구현 모듈

[CNOT 게이트 구현 광집적회로 측정장치도]

- ▶ 양자광원 및 양자 게이트 단일화 모듈 개발**
 - 실리콘 광집적회로 양자광원
 - SiN 및 실리콘 광집적회로 CNOT 게이트 소자
- ▶ SiN 광집적회로 양자 게이트 회로**
 - 상온동작 CNOT 게이트 구현
 - ✓ 확률적 게이트 동작
 - ✓ 81% CNOT 게이트 fidelity
 - ✓ μm scale 광도파로 사용
 - ✓ 0.2 dB/cm 광도파로 손실

[CNOT 게이트 측정 결과]

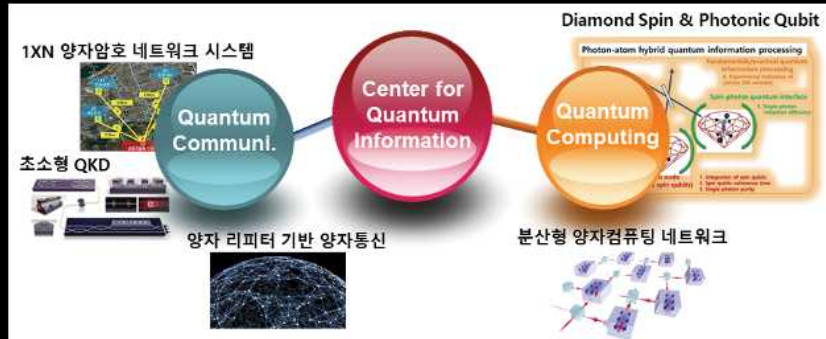
Fidelity : 81%

[CNOT 게이트 용 SiN 광집적회로 칩 구조]

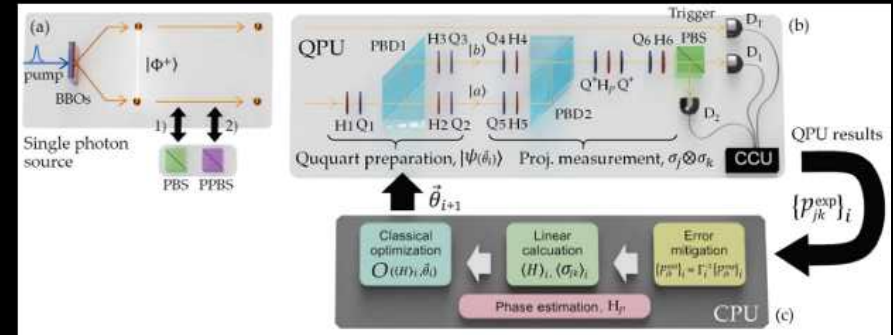
[단일 큐비트 광집적회로 경로 큐비트 구조도]

[실리콘 양자광원 및 CNOT 게이트 단일집적 광집적회로 모듈]

양자암호 네트워크 시스템



광자기반 양자시뮬레이터

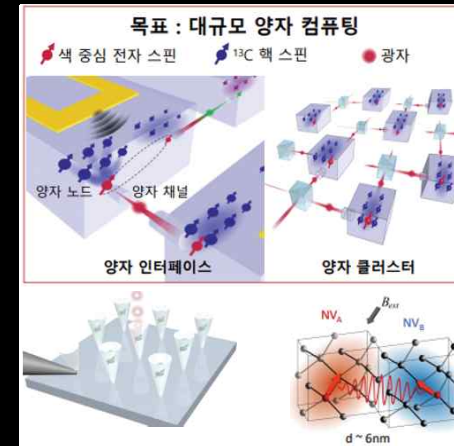


실환경 테스트베드

1x4 서울 강남 지역 네트워크

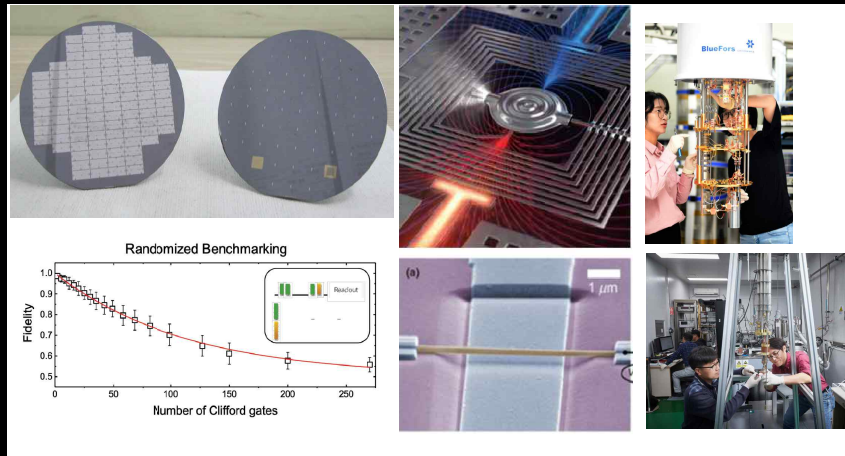


다이아몬드 점결함 큐비트 양자컴퓨터

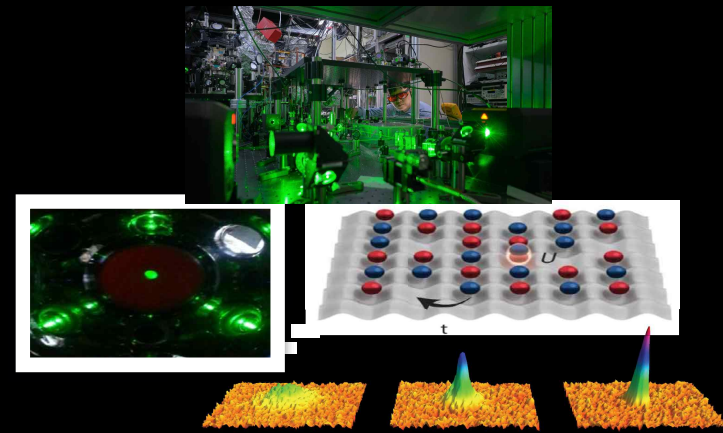


KRISS

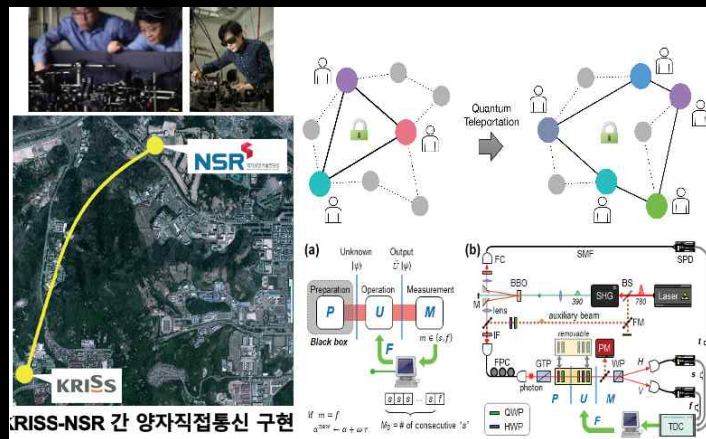
초전도체 기반 양자컴퓨팅 및 양자하이브리드 기술



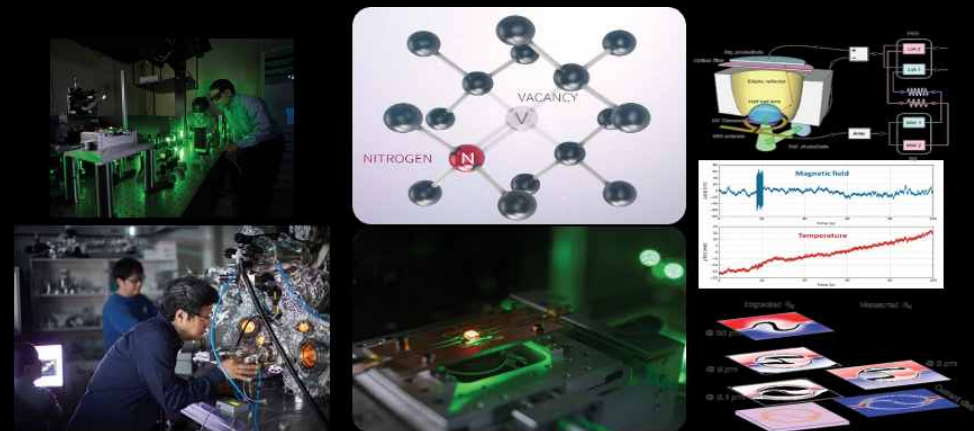
초저온원자 기반 양자시뮬레이터 기술



단일광자 기반 양자 네트워킹 / 센싱 및 계측 기술



다이아몬드/양자스핀 기반 양자센싱 기술



양자정보 국내 커뮤니티

- * 양자정보과학기술 연구회 (약칭. 양자 연구회)
 - * 회장: 지동표 교수 (서울대), 총무: 이진형 교수 (한양대)
 - * 양자정보 전문가 단체

- * 양자정보연구지원센터 @성균관대
 - * 센터장: 정연욱 교수
 - * 양자컴퓨팅 클라우드, 양자 펌 등 양자기술 개발 지원

- * **Quantum Computing KR @Facebook**
- * **Qiskit #Korean channel**

[발표 2]

양자클라우드 활용 및 연구지원

- 정연욱 센터장 (양자정보연구지원센터, 성균관대학교) -

SUNG KYUN KWAN UNIVERSITY(SKKU)



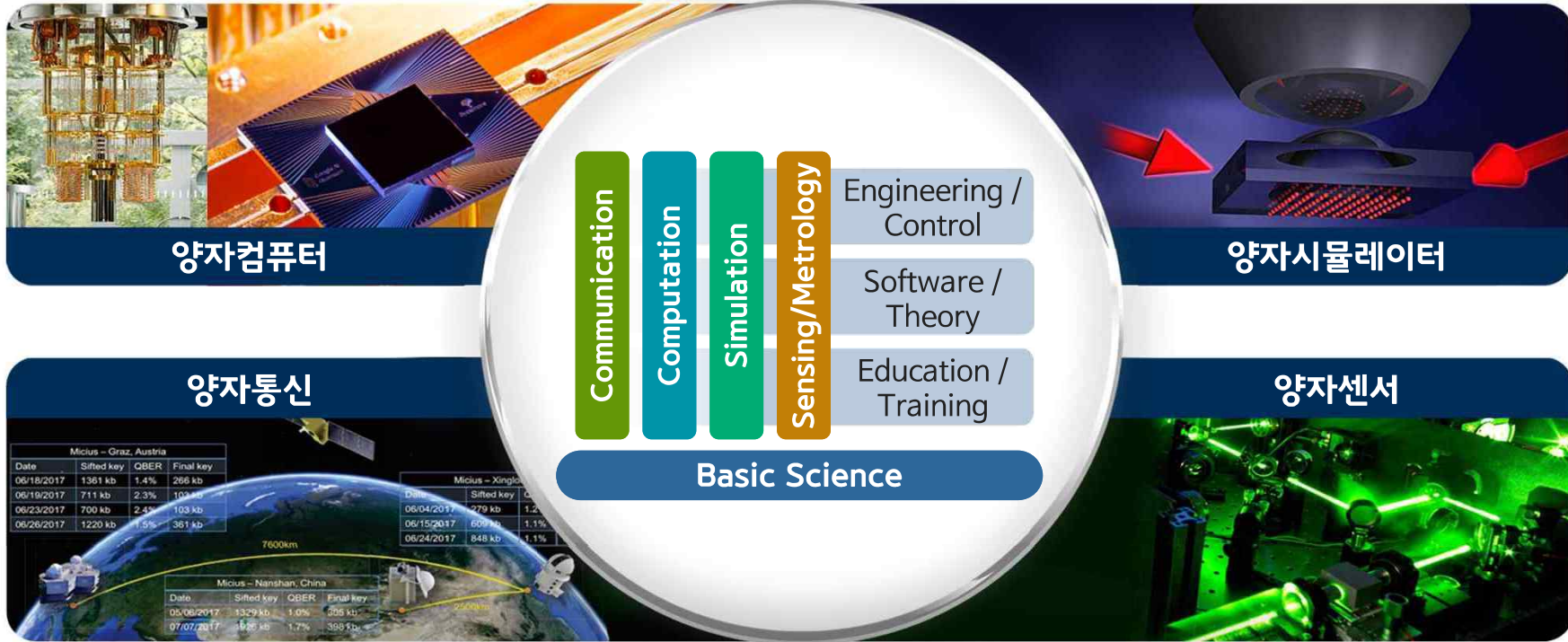
양자정보연구지원센터

양자클라우드 활용 및 연구지원

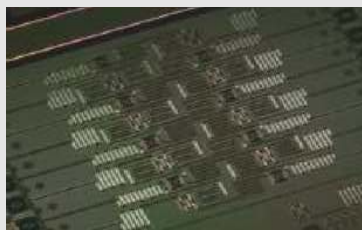
정연욱

성균관대학교

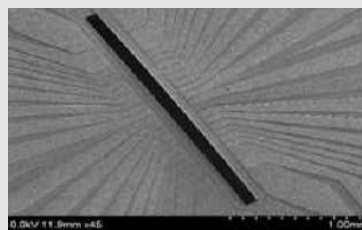
양자기술(Quantum Technology)과 양자정보과학



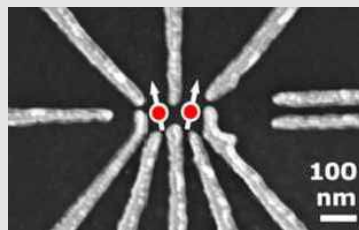
Qubit Platforms for Quantum Information Science



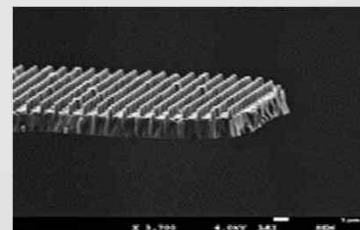
superconductor



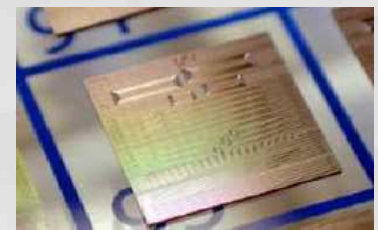
ion trap



quantum dot

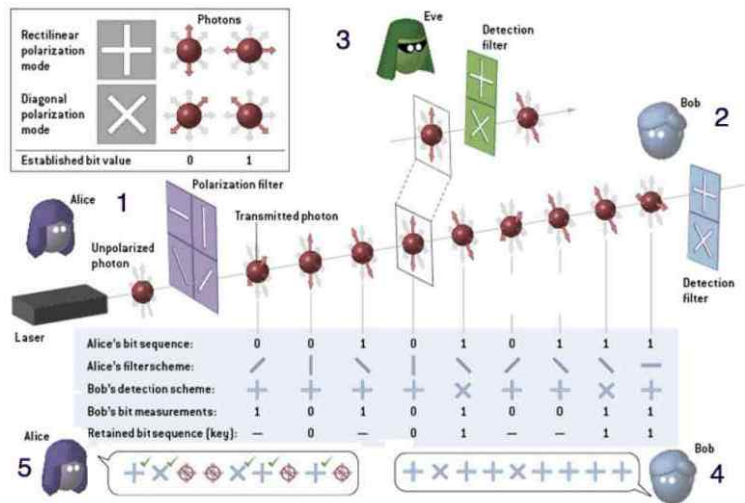


diamond NV



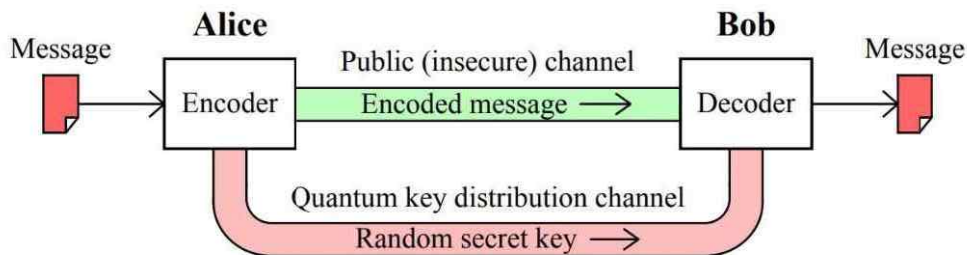
photon

양자채널(Quantum Channel) & 양자키분배(QKD, Quantum Key Distribution)



https://caislab.kaist.ac.kr/publication/paper_files/2016/20160623_JU.pdf

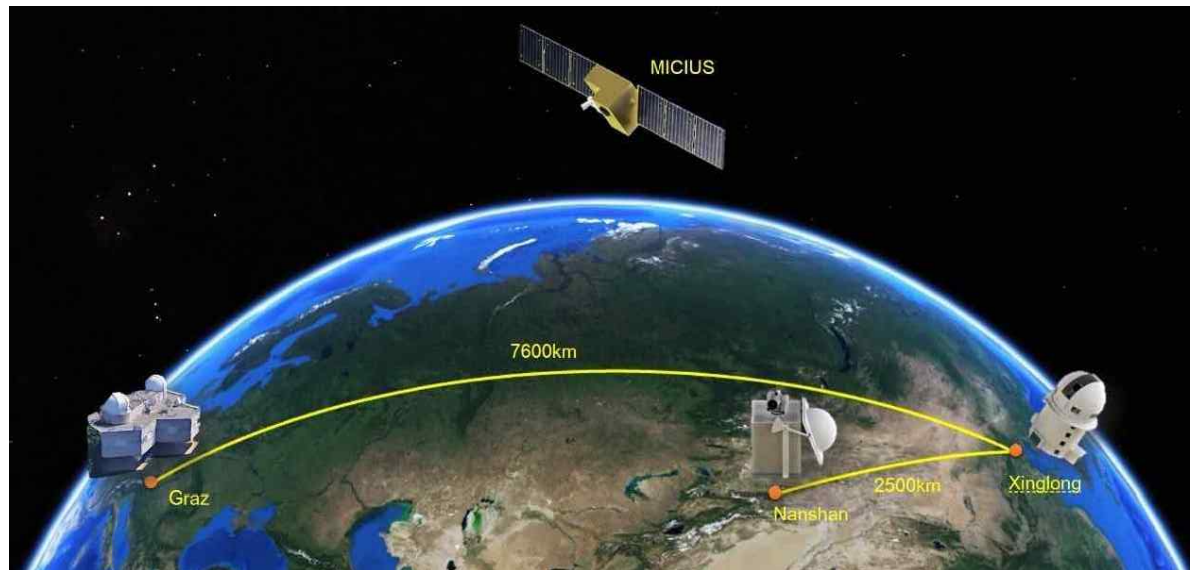
광자를 이용한 양자통신에서는 도청이 발생하면 신호가 없어지거나 바뀜



<https://medium.com/@jasminenharris/quantum-key-distribution-the-future-of-cybersecurity-44f11df4c92f>

암호키를 양자채널로 공유
그 암호키로 암호화한 메시지를 일반(고전)채널로 통신

인공위성을 이용한 양자통신 시연 (중국)

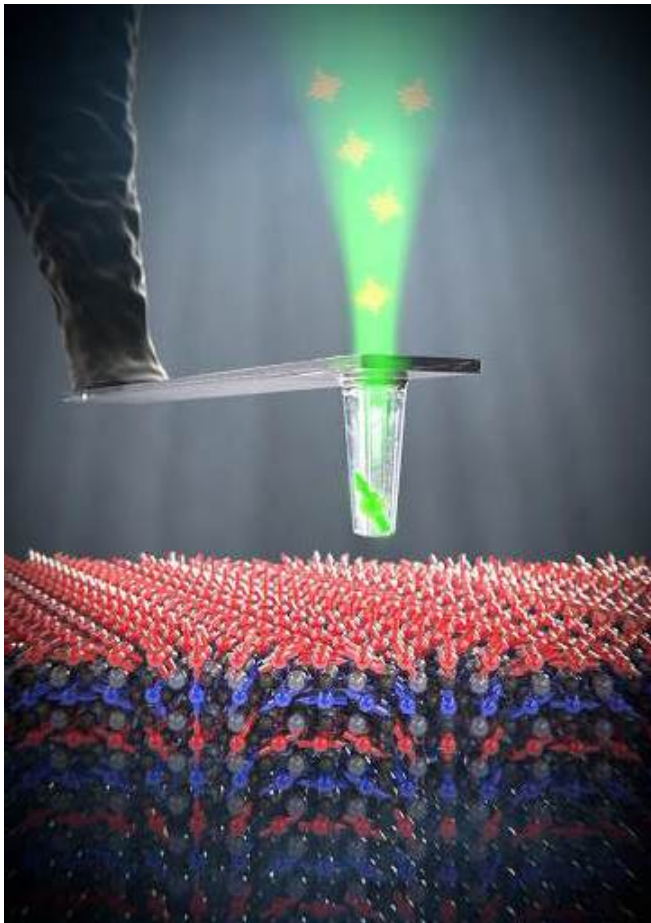


인공위성은
지상중계소와
양자통신을 하면서
신뢰성 있는
릴레이 역할

양자통신은

- 1) 광섬유로 서로 연결되어 있거나 또는 직선으로 서로 보여야 한다.
- 2) 광자가 중간에 없으면 안되므로 통신파장에서 너무 멀리까지 하지는 못한다.
- 3) 양자신호는 복제를 할 수 없기 때문에 증폭을 할 수 없다. - 양자중계기가 필요하다

양자역학적 현상을 이용한 극도로 정밀한 센서



<http://www.solidstatequantumtech-l2c.fr/research/quantumsensing>

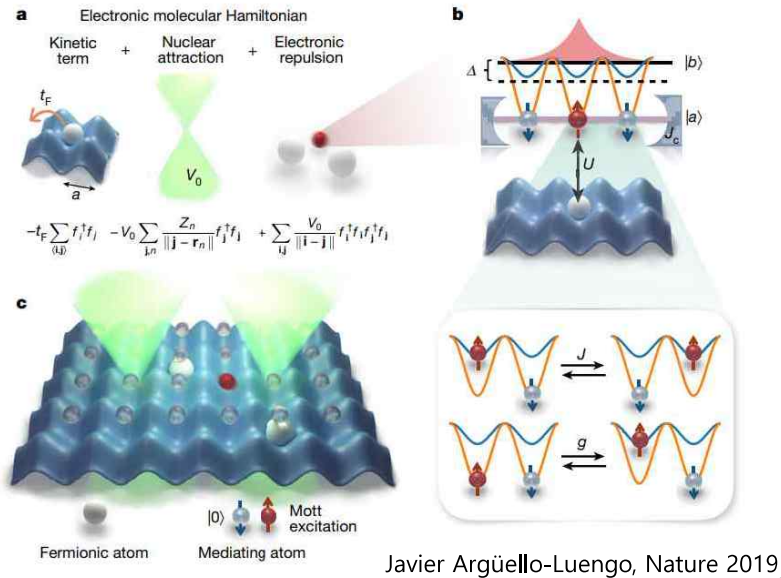
다이아몬드 NV센터
양자 자기장 센서

원자 센서
양자 중력 센서



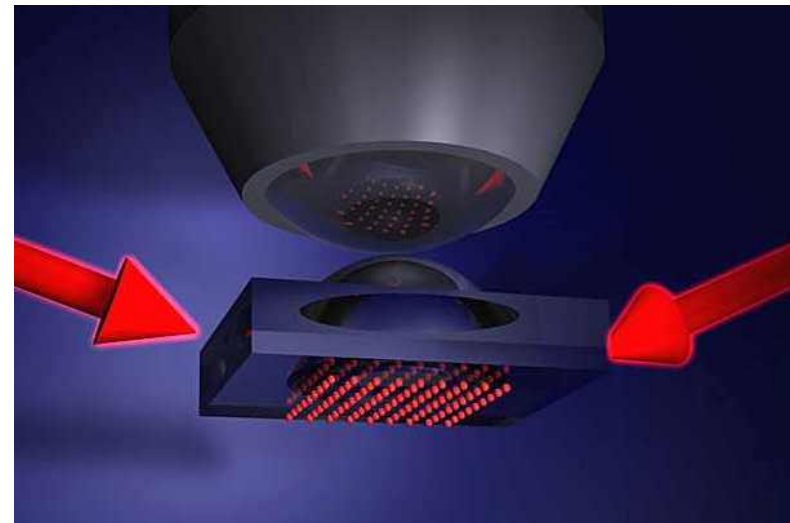
https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_30/september_2019/features/quantum_sensors_a_revolution_in_the_offing/

특정한 문제를 양자역학적으로 풀기 위하여 만든 계산 기계



해결하려는 문제를 수식화하여
원자시스템에 옮긴 후
원자의 거동을 관찰하면
그 문제를 풀 수 있음.

양자기체 현미경
원자를 직접 이미징하는
양자 시뮬레이터



<https://news.harvard.edu/gazette/story/2009/11/quantum-gas-microscope-created/>

양자컴퓨터에서 사용하는 양자역학 현상

큐비트 (Qubit)

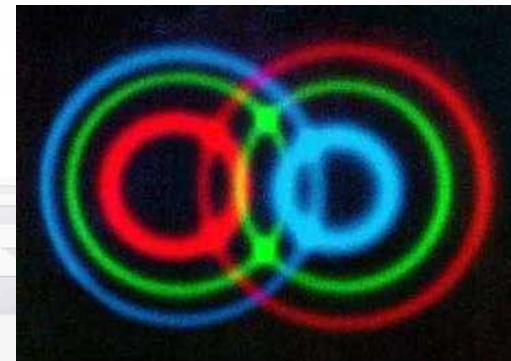
중첩 (superposition)



$$\begin{array}{c} \text{---} \\ |1\rangle \\ \text{---} \\ |0\rangle \end{array} \quad \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$
$$\alpha| \text{cat} \rangle + \beta| \text{cat}^{**} \rangle = \text{cat} ?$$

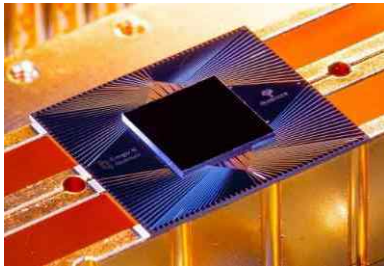
얽힘 (entanglement)

$$|00\rangle + |11\rangle$$



양자컴퓨터는 더 이상 상상이 아니고 현실

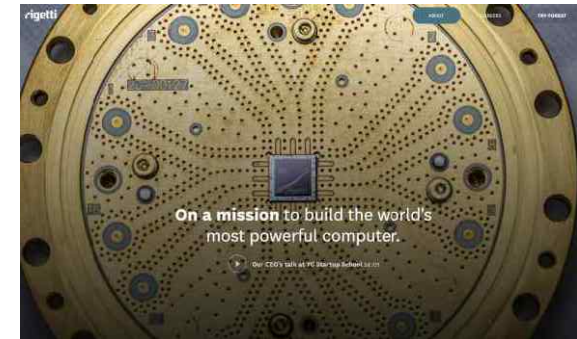
Google



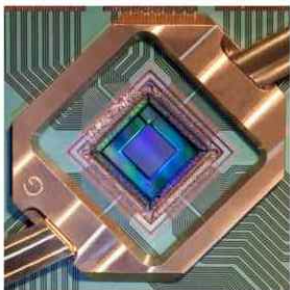
IBM



Rigetti



D-wave



Microsoft

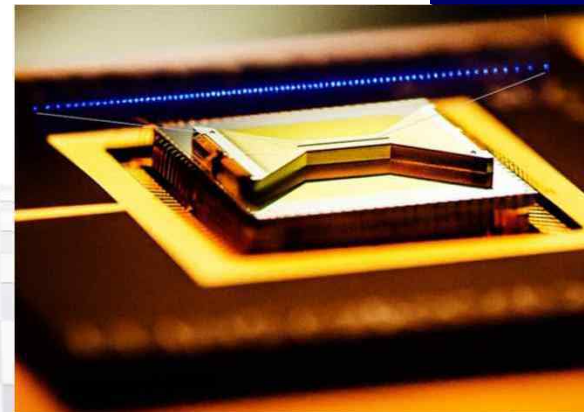
Intel

Amazon

PsiQ

AQT

Honeywell



IONQ



IonQ

양자컴퓨터 클라우드(Quantum Cloud)

Quantum Cloud Candidates

IBM Q Experience

Get started with IBM Quantum Experience

Drag & drop programming - no coding required

Python programming with Jupyter Notebooks

Microsoft Azure Quantum

Microsoft Azure Quantum

Application Area	Optimization	Machine Learning	Simulation of Quantum Systems	Cryptography
Solution Services	Quantum Solutions	1QBit	Hybrid Quantum-Crypto Solutions	
Software, Tools and Services	Python/C++/C#	Q#	QDK	Simulation Resource Estimation
Classical Compute	Azure			
Quantum Control	Room Temp Controller	Cryo Controller		
Quantum Devices	IONQ Honeywell Microsoft			

amazon Braket

aws Amazon Braket

Amazon Braket 개요 기능 하드웨어 공급자 FAQ

Amazon Braket

양자 컴퓨팅을 사용한 탐색 및 실험

블로그를 읽어보기

자세히 알아보기 >

자세히 알아보기 >

자세히 알아보기 >

제품 기능 확인 | 무료 계정에 가입 | 평가판 가입

Google

An open-source quantum framework for building and experimenting with noisy intermediate scale quantum (NISQ) algorithms on near-term quantum processors



An open-source platform for translating problems in chemistry and materials science into quantum circuits that can be executed on existing platforms



rigetti



D:WAVE

The Quantum Computing Company™



IONQ

Request Access

We are currently providing early access to select partners only. Sign up below to be placed on the invite list.



www.qcenter.kr



양자정보연구지원센터(Qcenter) 공간 모습



센터 전경



센터 전경



클라우드룸



세미나실



양자팍(구축중)

01 신진연구인력 연수프로그램

대상 | 국내 석/박사과정 재학생, 박사후연구원(Post-Doc.)
내용 | 양자정보 분야 국내·외 선도 연구그룹, 연구기관 등에서 연구 프로젝트 및 교육 프로그램 참여 지원

02 양자클라우드 활용 지원

활용 클라우드 | IonQ 양자클라우드, IBM Q 등
내용 | 개인단위 (IonQ), 기관단위 (IBM Q) 모집을 통해 양자클라우드 활용 기회 제공 및 교육/워크샵 추진

03 양자정보분야 교육/세미나 등 개최

내용 | 양자정보과학 분야 관련 교육/세미나 개최 및 지원, 양자정보주간 개최(2020년, 2021년 2회 개최 완료), 고등학생 대상 단기 교육(강의, 실습) 프로그램 운영, 관련 분야 재직자 교육 등 다양한 프로그램 운영

04 양자팍(양자소자 공정) 지원 ('22년 예정)

대상 | 국내 양자정보과학 분야 연구자
내용 | 양자소자 플랫폼별(초전도, 이온트랩 등) 소자 공정이 가능한 양자팍을 구축하여 파운드리 수준의 일괄공정(초전도 분야) 및 단위공정 지원

05 다양한 교육/영상 콘텐츠 제공

내용 | 다양한 강의/세미나 교육 영상, 전문가 대담영상과 함께 양자정보 분야에 쉽게 접근할 수 있는 다양한 영상 제공
채널 | '양자정보연구지원센터' 공식 유튜브 채널

06 연구/기술동향 자료 제공

내용 | 양자정보분야 글로벌 최신 뉴스, 기술동향 및 이슈 제공
채널 | 양자정보연구지원센터 홈페이지 내

IonQ and South Korea's Q Center Research and Educational Alliance

IonQ is enabling researchers, scientists, and students at Sungkyunkwan University and across South Korea to learn, develop, and deploy quantum applications on the world's leading quantum systems



SKKU 양자정보연구지원센터는 IonQ와 전략적 협력을 체결(세계최초)
국내 연구자들에게 IonQ 양자컴퓨터 클라우드 접속 및 연구/교육 활용 지원 중

IBM Q Network 활용



Quantum

Solutions

Systems

Tools

Learn

Careers

Launch IBM Quantum



Ways to join IBM Quantum Network

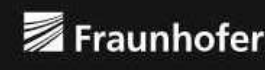
Contact us



Become an IBM Quantum Hub

IBM Quantum Hubs are regional centers of quantum computing education, research, development, and implementation that provide collaborators online access to IBM quantum technology.

Each Hub is enabled by IBM Q systems, and collaborates with IBM Quantum experts to advance quantum computing. The Hubs disseminate IBM Quantum technology access to their own members and support members in advancing and experimenting with quantum computing.



IBM Q Network Homepage - <https://www.ibm.com/quantum-computing/network/members/>

SKKU Hub는 국내 7개 대학에 IBM양자컴퓨터 무제한 접속 및 활용을 지원 중
(성균관대 + 서울대, 연세대, 고려대, 한양대, 포항공대, UNIST)

IBM Q 양자컴퓨터 클라우드

‘초전도기반’ 최대 65큐비트급 하드웨어

성균관대학교 소속 구성원은 자유롭게 IBM Q 사용 가능



성균관 + 6 대학교 provider

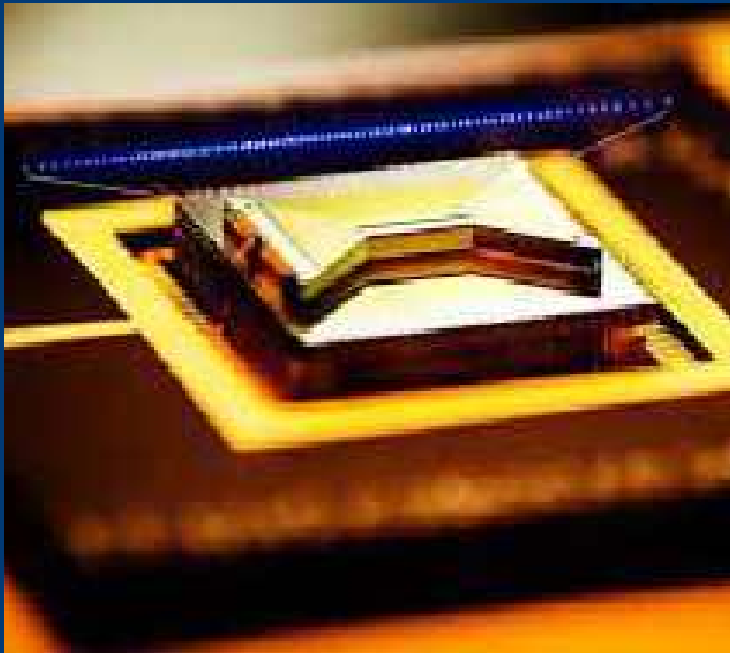
- ✓ 19개의 Quantum Backend
- 5 개의 Quantum Simulators 사용가능
- ✓ 시스템 예약가능

Provider	Allocated services
ibm-q-skku / internal / reservations	7 systems
ibm-q-skku / skku / skku-graduate	19 systems, 5 simulators
ibm-q-skku / skku / squirrel	19 systems, 5 simulators

IonQ 양자컴퓨터 클라우드

'이온트랩기반' 11큐비트급 하드웨어

누구나 자유롭게 IBM Q 사용 가능



양자클라우드 지원 현황

IBM-Q : 361 명 (대학)

- 대학 단위 지원
- 매년 3월 지원대학 선정

IonQ : 83 명 (산학연)

- 개인별 지원, 제안서 심사
- 수시 접수 및 선정지원

AWS Braket : 19 명 (산학연)

- 개인별 지원

각종 경진대회 및 강의활용 지원

IBM-Q 클라우드

IBM Quantum Services

Search by system name

All systems (23)

큐비트 갯수 성능 지수 처리 속도

System Name	Status	Processor Type	Qubits	QV	CLOPS
ibmq_washington	Offline	Eagle r1	127		
ibmq_brooklyn	Online	Hummingbird r2	65	32	1.5K
ibmq_kolkata	Online - Queue paused	Falcon r5.11	27	128	2K
ibmq_montreal	Online	Falcon r4	27	128	2K
ibmq_mumbai	Online	Falcon r5.1	27	128	1.8K
ibmq_peekskill	Offline	Falcon r8	27		
ibmq_cairo	Online	Falcon r5.11	27	64	2.4K
ibmq_hanoi	Online	Falcon r5.11	27	64	2.3K
ibmq_toronto	Online	Falcon r4	27	32	1.8K
ibmq_sydney	Online - Queue paused	Falcon r4	27	32	1.8K
ibmq_guadalupe	Online	Falcon r4P	16	32	2.4K
ibmq_perth	Online	Falcon r5.11H	7	32	2.9K
ibmq_lagos	Online	Falcon r5.11H	7	32	2.7K
ibmq_nairobi	Online	Falcon r5.11H	7	32	2.6K
ibmq_casablanca	Online	Falcon r4H	7	32	2.3K
ibmq_jakarta	Online	Falcon r5.11H	7	16	2.4K
ibmq_manila	Online	Falcon r5.11L	5	32	2.8K
ibmq_bogota	Online	Falcon r4L	5	32	2.3K
ibmq_santiago	Online - Queue paused	Falcon r4L	5	32	
ibmq_quito	Online	Falcon r4T	5	16	2.5K
ibmq_belem	Online	Falcon r4T	5	16	2.5K
ibmq_lima	Online	Falcon r4T	5	8	2.7K
ibmq_armonk	Online - Queue paused	Canary r1.2	1	1	

IBM Quantum Composer

Composer files

Name	Updated
Untitled circuit	2 months ago
Untitled circuit	3 months ago

File Edit Inspect View Share

Untitled circuit *Saved*

Visualizations seed 7520

Qiskit Read only

Open in Quantum Lab

```

1 from qiskit import
  QuantumRegister,
  ClassicalRegister,
  QuantumCircuit
2 from numpy import pi
3
4 qreg_q = QuantumRegister(5,
  'q')
5 creg_c = ClassicalRegister
  (5, 'c')
6 circuit = QuantumCircuit
  (qreg_q, creg_c)
7
8 circuit.h(qreg_q[0])
9 circuit.cx(qreg_q[0], qreg_q
  [1])
10 circuit.cx(qreg_q[0], qreg_q
  [2])
11 circuit.cx(qreg_q[0], qreg_q
  [3])
12 circuit.cx(qreg_q[0], qreg_q
  [4])
13 circuit.measure(qreg_q[0],
  creg_c[0])
14 circuit.measure(qreg_q[1],
  creg_c[1])
15 circuit.measure(qreg_q[2],
  creg_c[2])
  
```

Probabilities

Computational basis states	Probability
00000	1.0
00011	0.0
00130	0.0
01001	0.0
01100	0.0
01111	0.0
10010	0.0
10101	0.0
11000	0.0
11011	0.0
11110	0.0

Q-sphere

State Phase angle

Qiskit을 이용한 IonQ 백엔드 활용

Job Summary

Name	Untitled
ID	7b82fc86-7a16-4a33-9e0f-048a9c6499b5
Status	✔ completed
Requested	Tue, 26 Oct 2021 06:09:18 GMT
Completed	Tue, 26 Oct 2021 06:09:19 GMT
Executed in	21ms
Predicted	16ms



Program

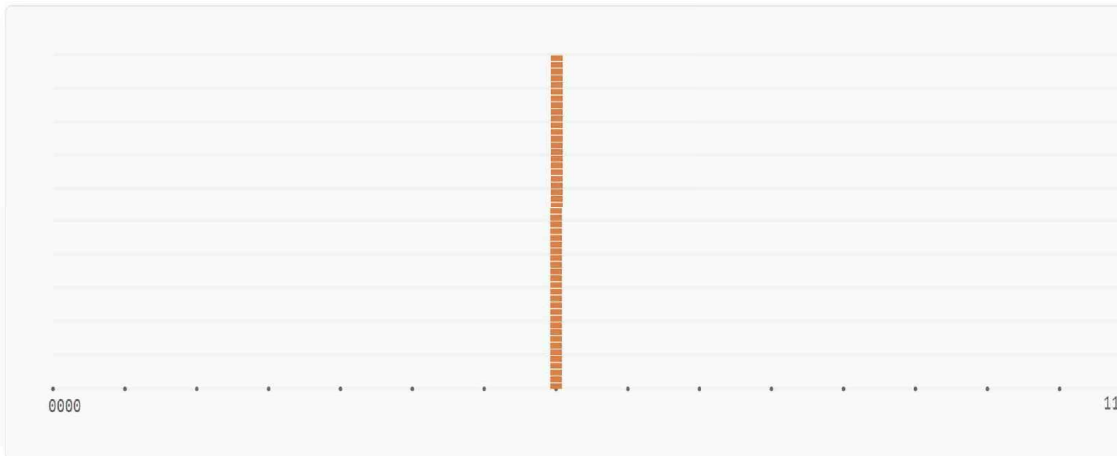
```
1 []
2 {
3   "gate": "x",
4   "targets": [
5     0
6   ]
7 },
8 {
9   "gate": "x",
10  "targets": [
11    1
12  ]
13 },
14 {
```

Quantum circuit diagram showing 4 qubits (0, 1, 2, 3). Qubit 0 has an X gate. Qubit 1 has an X gate, followed by an RX gate (0.392) and an RY gate (1.570). The circuit is shown in a vertical layout with a zoom level of 180% and a download button.

Metadata

shots	"2048"
sampler_seed	"None"
qiskit_header	"H4sIAI6bd2EC/1200QrCMAxFf2XkWWHqfPFXxghtKb0QrqbHqb476YbBPxtcs/NIS+IPqa8YqE0F7g13aGBkZI1hI+7KV6qVqoJebFBF50AL2S1hPL5BSpf9iCU8fv31PTgpu2Goh0QWYVhPX6wVtKeTpr0my3bJf05W5/bPj5PVyepkdfLufH8AQ25BufIAAAA="

Results

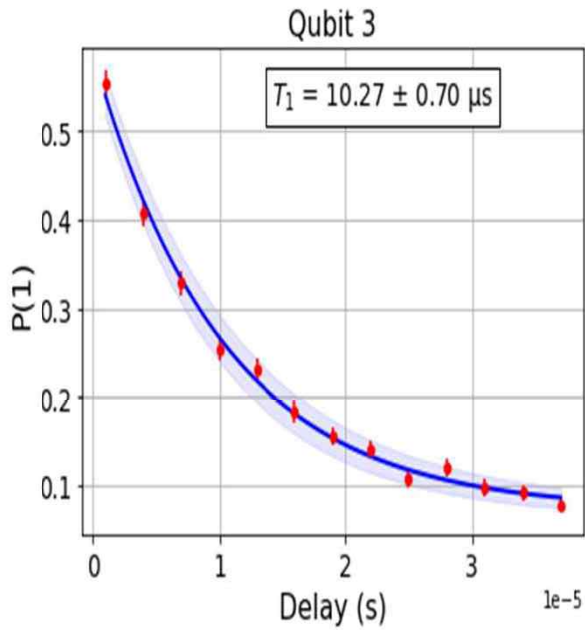


Output

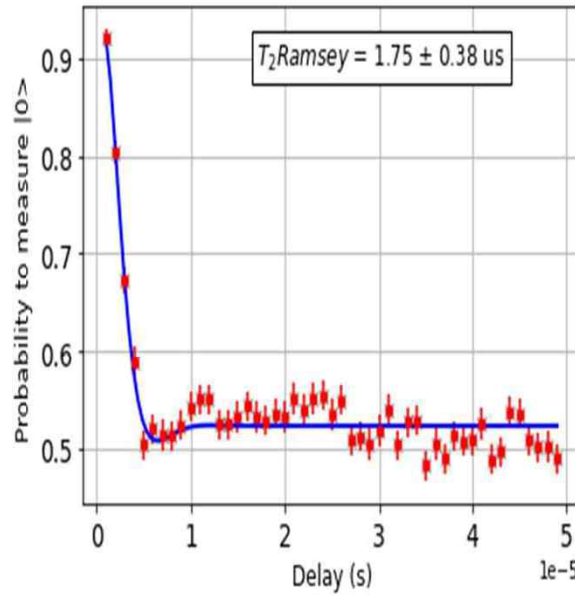
```
✔ status: completed
# predicted_execution_time: 16
▶ registers: {meas_mapped: []}
▶ metadata: {shots: "2048", sampler_seed: "None", qiskit_header: "H4sIAI6bd2..."}
@ execution_time: 21 ms
# qubits: 4
🗒 type: "circuit"
📅 request: Tue, 26 Oct 2021 06:09:18 GMT
# start: 1635228559
📅 response: Tue, 26 Oct 2021 06:09:19 GMT
▶ data: {histogram: [], registers: []}
▶ gate_counts: {1q: 57, 2q: 44}
🗒 id: "7b82fc86-7a16-4a33-9e0f-048a9c6499b5"
🗒 target: "simulator"
▶ script: {lang: "json", body: []}
```

양자클라우드 백엔드 특성 확인

Component experiment 1

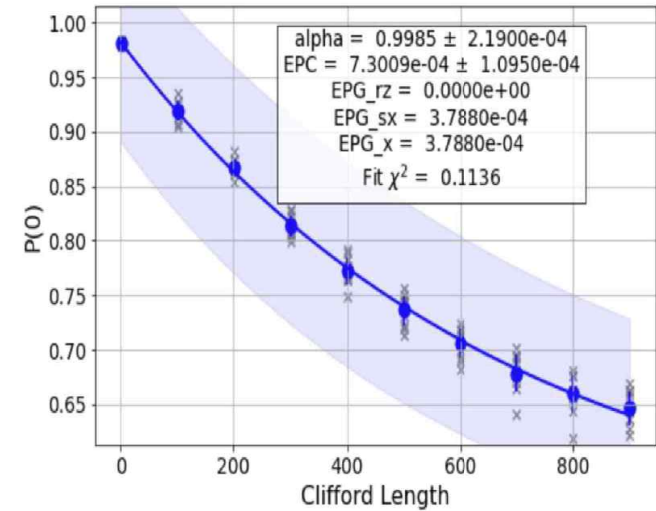


```
DbAnalysisResultV1
- name: T1
- value: 1.0272741740106604e-05 ± 7.007644304415822e-07 s
- χ²: 0.7717121568549775
- quality: bad
- extra: <9 items>
- device_components: ['Q3']
- verified: False
```



```
DbAnalysisResultV1
- name: T2star
- value: 1.7470931526852868e-06 ± 3.81620844877249e-07 s
- χ²: 1.5801497696665117
- quality: bad
- extra: <10 items>
- device_components: ['Q1']
- verified: False
DbAnalysisResultV1
- name: Frequency
- value: 87509.40178375931 ± 9363.388112560515 Hz
- χ²: 1.5801497696665117
- quality: bad
- extra: <10 items>
- device_components: ['Q1']
- verified: False
```

Component experiment 0



```
DbAnalysisResultV1
- name: @Parameters_RBAnalysis
- value: [0.46828341 0.99853983 0.51406031] ± [0.04557496 0.000219 0.04581386]
- χ²: 0.11362396283915219
- extra: <3 items>
- device_components: ['Q0']
- verified: False
DbAnalysisResultV1
- name: alpha
- value: 0.9985398294649062 ± 0.00021900419974582927
- χ²: 0.11362396283915219
- device_components: ['Q0']
- verified: False
DbAnalysisResultV1
- name: EPC
- value: 0.0007300852675469205 ± 0.00010950209987291464
- χ²: 0.11362396283915219
- device_components: ['Q0']
- verified: False
DbAnalysisResultV1
- name: EPG_rz
- value: 0.0
- χ²: 0.11362396283915219
- device_components: ['Q0']
- verified: False
DbAnalysisResultV1
```

양자 머신러닝 (Quantum Machine Learning)

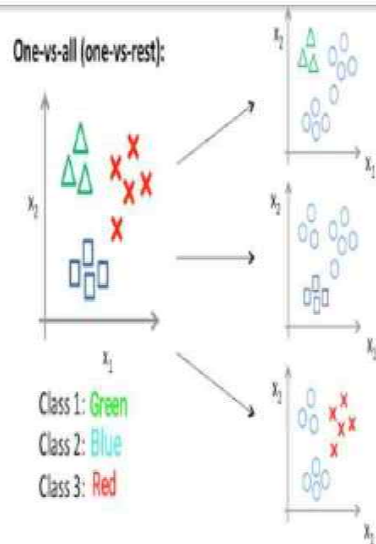


Figure 10: One-vs-all

1. Data preparation

The data is one looking with here as a small subset of coding image dataset called Fashion-MNIST, which is a subset of the MNIST dataset. We aim to classify the following data:

- label 0: T-shirt
- label 2: pullover
- label 3: dress

First, let's load the dataset and display the image for each class:

```

1 from MNIST import
2 MN, MNV = torchvision.datasets.mnist
3 data = MN(0, 40)
4
5 sample_train = data.train_loader()
6 labels_train = data.train_loader()
7 sample_test = data.test_loader()
8
9 # Split into data
10 sample_train, sample_val, labels_train, labels_val = train_test_split(
11     sample_train, labels_train, test_size=0.2, random_state=0)
12
13 # Visualize samples
14 fig = plt.figure()
15
16 labels = [0, 2, 3]
17 num_labels = len(labels)
18 for i in range(num_labels):
19     m = plt.subplot(1, num_labels, i+1)
20     img = sample_train[labels_train==labels[i]](0).reshape(28, 28)
21     m.imshow(img, cmap='gray')
    
```

2. Modeling

Based on the One-vs-Rest approach, you need to create the following three QSVM binary classifiers

- the label 0 and the rest
- the label 2 and the rest
- the label 3 and the rest

Here is the first one as a hint.

2.1: Label 0 vs Rest

Create new labels with label 0 as positive(1) and the rest as negative(0) as follows.

```

1 labels_train_0 = np.where(labels_train==0, 1, 0)
2 labels_val_0 = np.where(labels_val==0, 1, 0)
3
4 print(f'Original validation labels: {labels_val}')
5 print(f'Validation labels for 0 vs Rest: {labels_val_0}')
    
```

See only places where the original label was 0 are set to 1.

Next, construct a binary classifier using QSVM as before.

Note that PauliFeatureMap is used in this hint but you can use a different feature map.

```

1 pauli_map_0 = PauliFeatureMap(feature_dimension=N_DIM, reps=2, paulis = ['X', 'Y', 'ZZ'])
2 pauli_kernel_0 = QuantumKernel(feature_map=pauli_map_0, quantum_instance=Aer.get_backend('statevector_simulator'))
3 pauli_svc_0 = SVC(kernel='precomputed', probability=True)
4
5 matrix_train_0 = pauli_kernel_0.evaluate(x_vec=sample_train)
6 pauli_svc_0.fit(matrix_train_0, labels_train_0)
7
8 matrix_val_0 = pauli_kernel_0.evaluate(x_vec=sample_val, y_vec=sample_train)
9 pauli_score_0 = pauli_svc_0.score(matrix_val_0, labels_val_0)
10 print(f'Accuracy of discriminating between label 0 and others: {pauli_score_0*100}%')
    
```

You can see that the QSVM binary classifier is able to distinguish between label 0 and the rest with a reasonable probability.

Finally, for each of the test data, calculate the probability that it has label 0. It can be obtained by `predict_proba` method.

```

1 matrix_test_0 = pauli_kernel_0.evaluate(x_vec=sample_test, y_vec=sample_train)
2 pred_0 = pauli_svc_0.predict_proba(matrix_test_0)[0, 1]
3 print(f'Probability of label 0: {np.round(pred_0, 2)}')
    
```

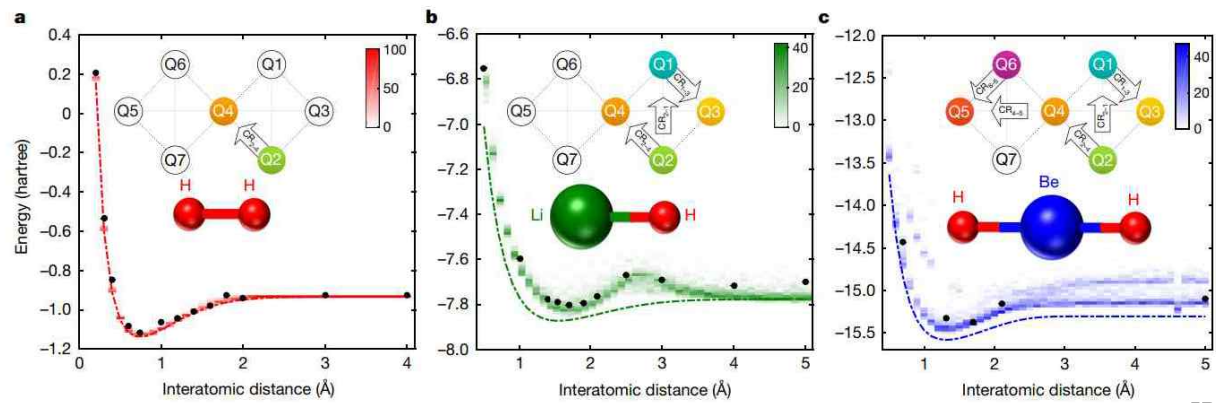
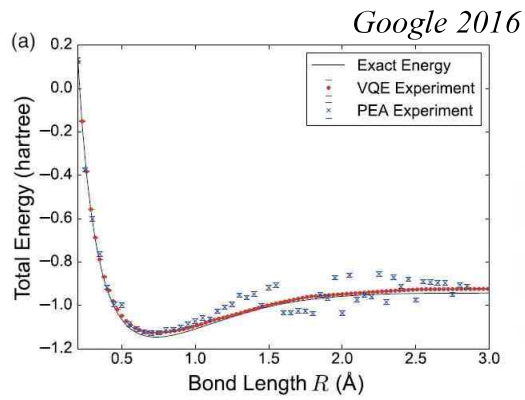
These probabilities are important clues for multiclass classification.

Obtain the probabilities for the remaining two labels in the same way.

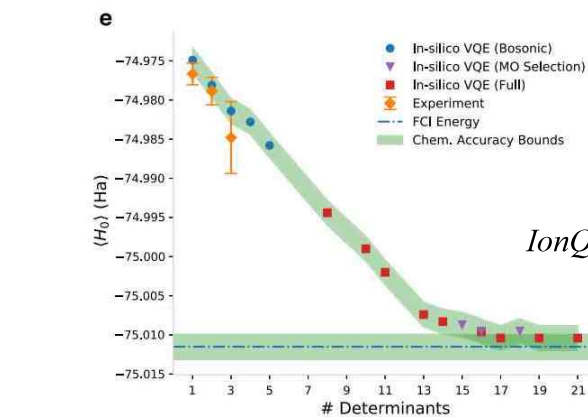
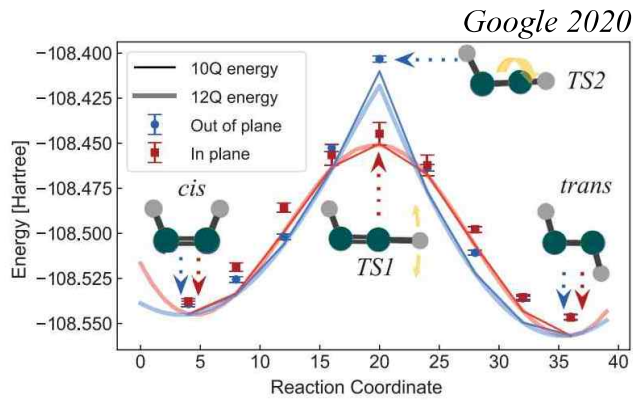
2.2: Label 2 vs Rest

Build a binary classifier using QSVM and get the probability of label 2 for test dataset.

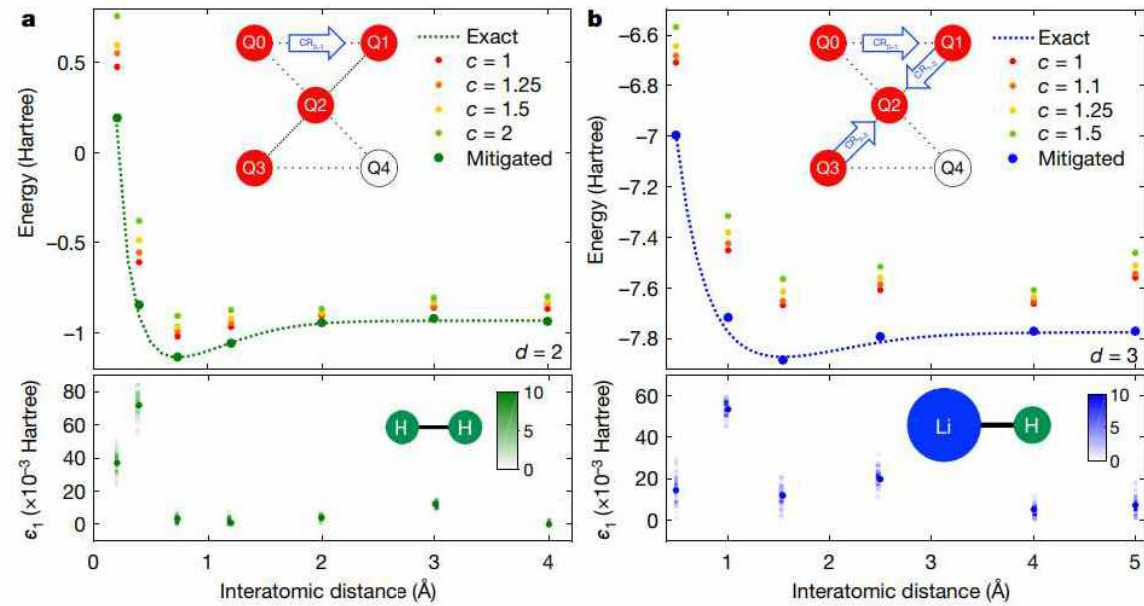
소재물성, 화학반응 등



IBM 2017



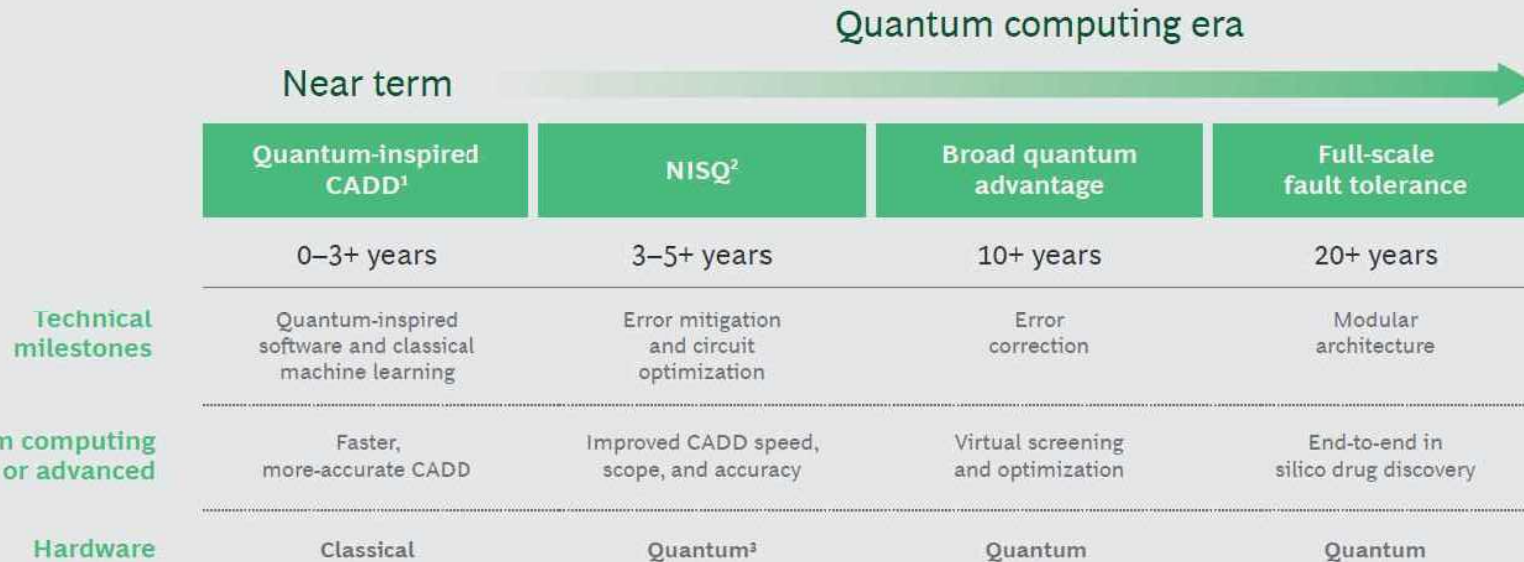
IonQ 2020



IBM 2019

양자컴퓨터의 응용 - 신약개발

EXHIBIT 2 | The Journey Toward Quantum Drug Discovery



Source: BCG experience and analysis.


¹CADD = computer-aided drug discovery.

²NISQ = noisy intermediate-scale quantum.

TIME AND COST PER LAUNCH	Variable time and cost		~4.5 years ~\$700 million	~1 year ~\$200 million	~6 years ~\$1,200 million-\$1,700 million	~1.5 year ~\$50 million		
STAGE	Target ID <i>Identify disease drivers</i>	Target validation <i>Confirm role of target(s)</i>	Assay development <i>Develop tests to measure target impact</i>	Screening <i>Identify hit compounds</i>	Optimization <i>Optimize hits, and select drug candidate</i>	Preclinical <i>Study metabolism, toxicology, etc.</i>	Clinical trials <i>Test drug in humans for efficacy, safety, and dosing</i>	Regulatory submission and review <i>Submit dossier for approval</i>
KEY PAIN POINT(S)	Weak signal in large data sets	Experimental limitations	Unreliability of tests	Lack of exhaustiveness	Inability to optimize some hits	Low predictive value	>90% failure rate; high costs	Uncertainty and launch delays
VALUE UNLOCK	Better algorithms; higher computing power	Algorithms that reflect human systems	Virtual screening of massive virtual libraries	Significantly improved drug design	Algorithms that better predict the human system	Algorithms that simulate drug/patient interactions	Rapid analysis of clinical trials and other data sources	
	← Second-largest potential for quantum computing →		← Largest potential for quantum computing; expect first use here →		← Third-largest, least-certain potential for quantum computing; long time horizon →			

What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing?

July 2021
By Jean-François Bobier, Matt Langone, Edward Tao, and Antoine Gourevitch



Leading in the New Reality
Digital Transformation | **BCG**

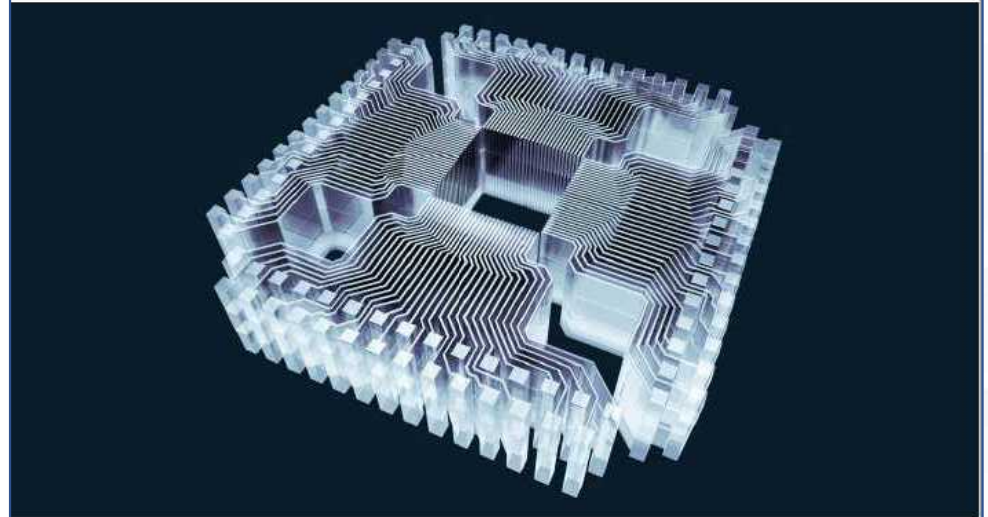
McKinsey & Company

Automotive & Assembly Practice

Will quantum computing drive the automotive future?

As quantum computing comes closer to reality, automotive players are exploring its potential.

by Ondrej Burkacky, Niko Mohr, and Lorenzo Pautasso



September 2020

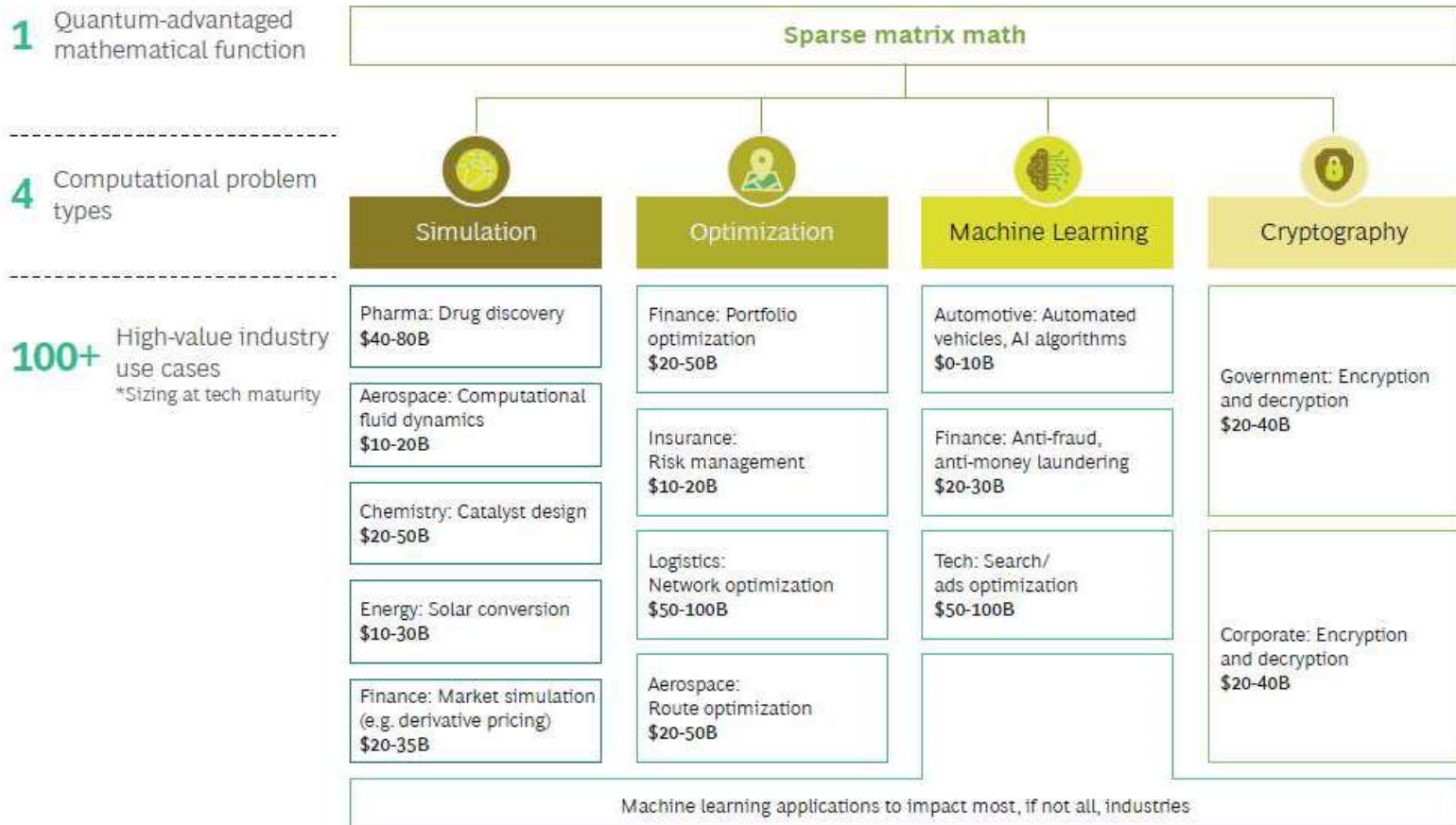
© ALFRED PASER/AUGUSTINE PASTEL/SHUTTERSTOCK/Getty Images

What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing?

July 2021
By Jean-François Bobier, Matt Langione,
Edward Tao, and Antoine Gourevitch



Exhibit 2 - Four Quantum-Advantaged Problem Types Unlock Hundreds of Use Cases at Tech Maturity



양자컴퓨터로 무엇을 할 것인가? - 양자 알고리즘

Quantum Algorithm Zoo

This is a comprehensive catalog of quantum algorithms. If you notice any errors or omissions, please email me at stephen.jordan@nist.gov. Your help is appreciated and will be [acknowledged](#).

Algebraic and Number Theoretic Algorithms

Algorithm: Factoring

Speedup: Superpolynomial

Description: Given an n -bit integer, find the prime factorization. The quantum algorithm of Peter Shor solves this in $\tilde{O}(n^3)$ time [82, 125]. The fastest known classical algorithm for integer factorization is the general number field sieve, which is believed to run in time $2^{\tilde{O}(n^{1/3})}$. The best rigorously proven upper bound on the classical complexity of factoring is $O(2^{n^{1/3+o(1)}})$ [252]. Shor's factoring algorithm breaks RSA public-key encryption and the closely related quantum algorithms for discrete logarithms break the DSA and ECDSA digital signature schemes and the Diffie-Hellman key-exchange protocol. A quantum algorithm even faster than Shor's for the special case of factoring "semiprimes", which are

Oracular Algorithms

Algorithm: Searching

Speedup: Polynomial

Description: We are given an oracle with N allowed inputs. For one input w ("the winner") the corresponding output is 1, and for all other inputs the corresponding output is 0. The task is to find w . On a classical computer this requires $\Omega(N)$ queries. The quantum algorithm of Lov Grover achieves this using $O(\sqrt{N})$ queries [48], which is optimal [216]. This algorithm has subsequently been generalized to search in the presence of multiple "winners" [15], evaluate the sum of an arbitrary function [15, 16, 73], find the global minimum of an arbitrary function [35, 75, 255], take advantage of alternative initial states [100] or nonuniform probabilistic priors [123], work with oracles whose runtime varies between inputs [138], approximate definite integrals [77], and converge to a fixed-point [208, 209]. The generalization of Grover's algorithm known as amplitude estimation [17] is now an important primitive in quantum algorithms. Amplitude estimation forms the core of most known quantum algorithms related to collision finding and graph properties. One of the natural applications for Grover search is speeding up the solution to NP-complete problems such as 3-SAT. Doing so is nontrivial, because the best classical algorithm for 3-SAT is not quite a brute force search. Nevertheless, amplitude amplification enables a quadratic quantum speedup over the best classical 3-SAT algorithm, as shown in [133]. Quadratic speedups for other constraint satisfaction problems are obtained in [134]. For further examples of application of Grover search and amplitude amplification see [261, 262]. A problem closely related to, but harder than, Grover search, is spatial search, in

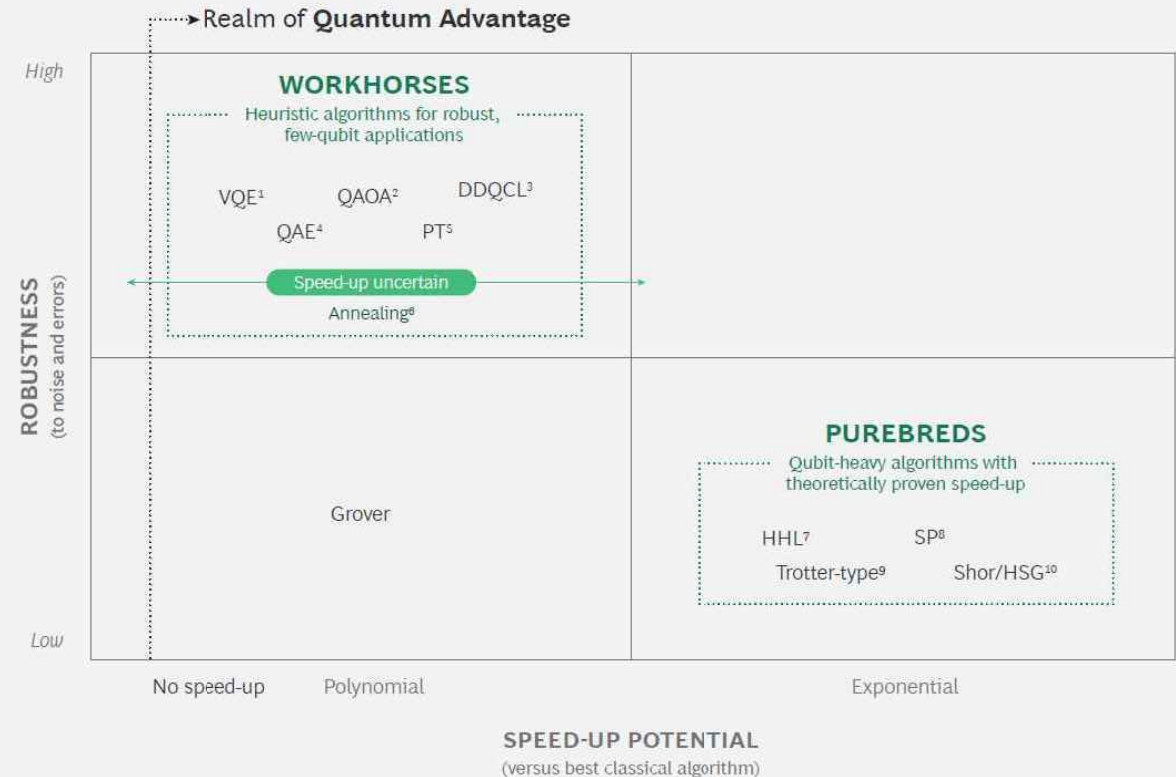
Approximation and Simulation Algorithms

Algorithm: Quantum Simulation

Speedup: Superpolynomial

Description: It is believed that for any physically realistic Hamiltonian H on n degrees of freedom, the corresponding time evolution operator e^{-iHt} can be implemented using $\text{poly}(n, t)$ gates. Unless $\text{BPP}=\text{BQP}$, this problem is not solvable in general on a classical computer in polynomial time. Many techniques for quantum simulation have been developed for general classes of Hamiltonians [25, 95, 92, 5, 12, 170, 205, 211, 244, 245, 273, 293, 294, 295], chemical dynamics [63, 68, 227, 310], condensed matter physics [1, 99, 145], and quantum field theory [107, 166, 228, 229, 230]. The exponential complexity of classically simulating quantum systems led Feynman to first propose that

EXHIBIT 8 | Workhorse Algorithms Will Dominate During the NISQ Era



Sources: BCG analysis; expert interviews.

¹Variational quantum eigensolver.

²Quantum approximate optimization algorithm.

³Data-driven quantum circuit learning for generative modeling in machine learning tasks.

⁴Quantum auto encoder, a compression algorithm for quantum data.

⁵Population transfer between computational states with similar energies for search and reverse annealing optimization.

⁶Optimization by quantum annealing as an alternative to circuit-based algorithms.

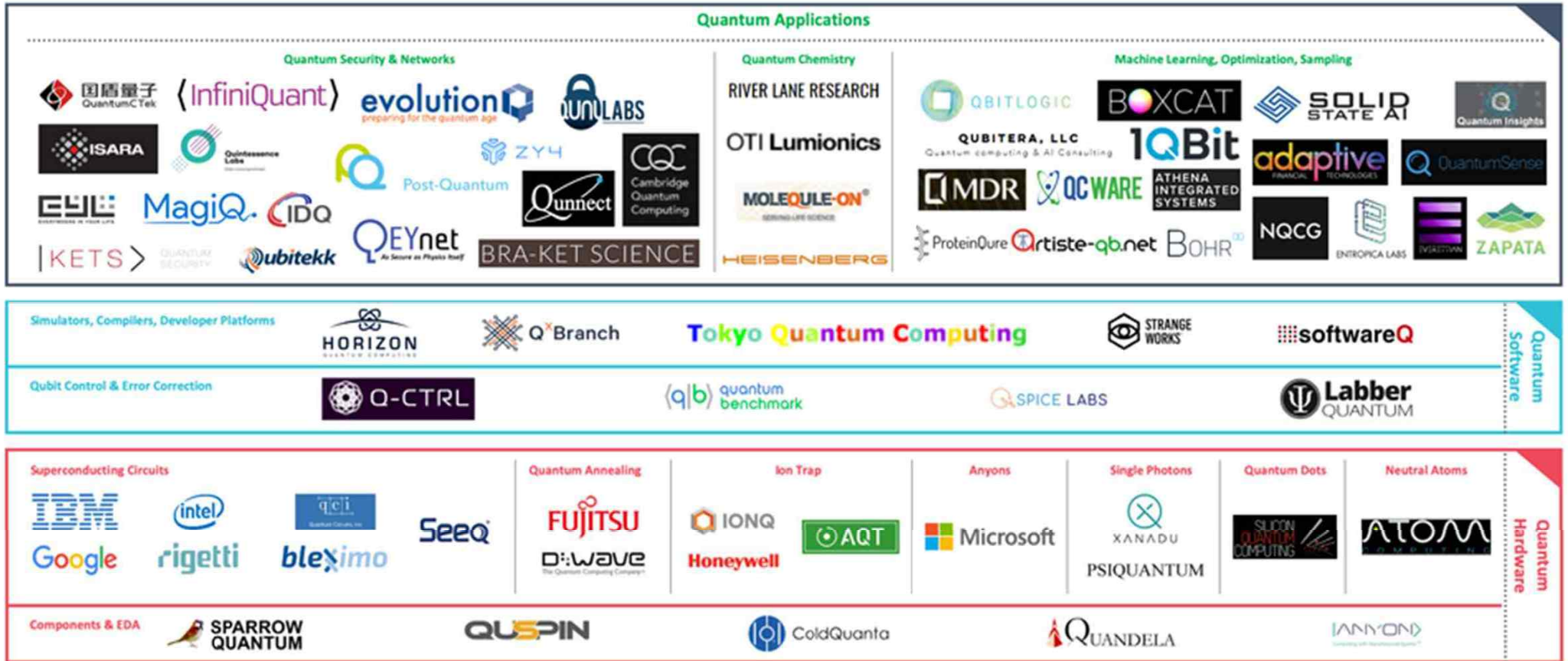
⁷Linear-system-solving algorithm devised by Harrow, Hassidim, and Lloyd.

⁸Semidefinite programming.

⁹Trotter-based algorithms for molecular simulation and adiabatic state preparation.

¹⁰Algorithms exploiting hidden-subgroup symmetries such as Shor's algorithm.

QUANTUM COMPUTING LANDSCAPE 2019



www.112capital.com

11:2 CAPITAL

SUNG KYUN KWAN UNIVERSITY(SKKU)



THANK YOU

정연욱

성균관대학교

[발표 3]

신소재 개발을 위한 양자정보 기술

- 김용수 책임연구원(한국과학기술연구원 양자정보연구단) -

신소재 개발을 위한 양자정보 기술

김 용 수

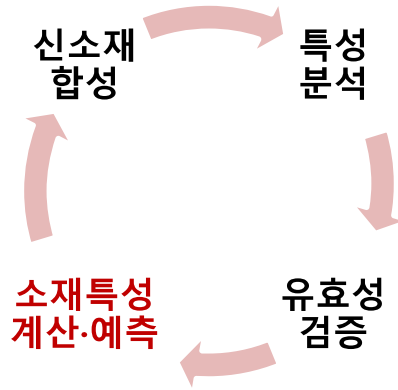
한국과학기술연구원 (KIST)

양자정보연구단

2021-12-10

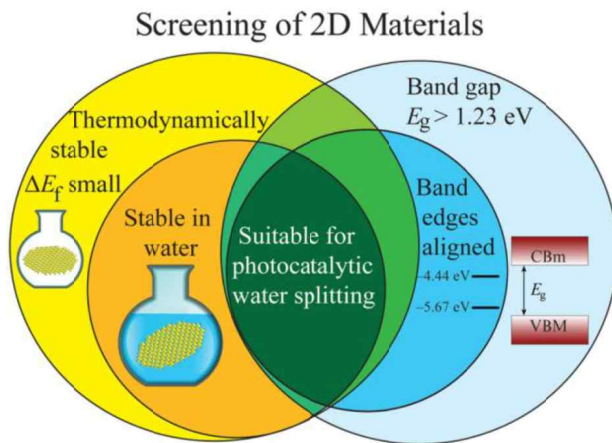
신소재 개발과정

- 모델링, 근사, 수치계산
- (최근)빅데이터, 머신러닝

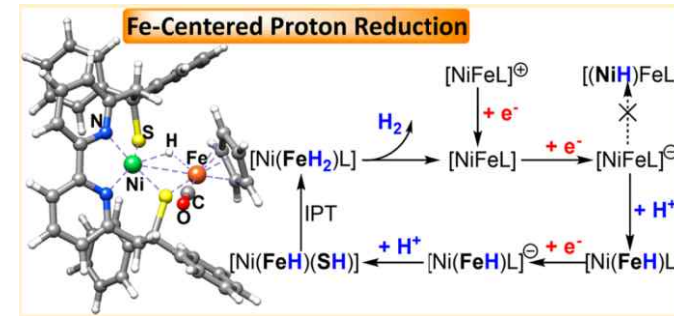
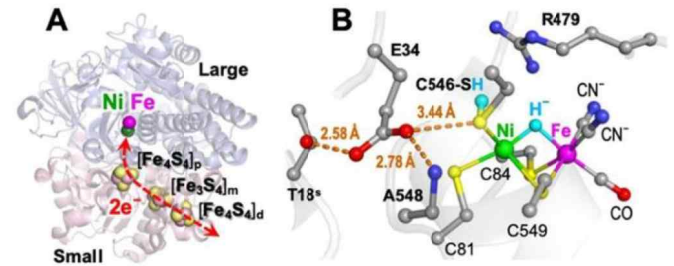
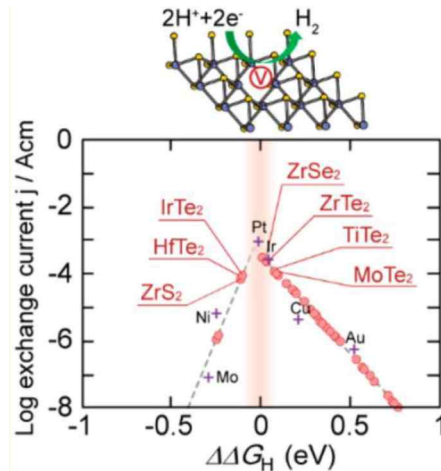


- 신소재 개발은 시행착오(trial-and-error) 과정을 통해 통상 10년 이상 소요
- 핵심 장애물은 **소재 특성 계산의 부정확도**와 이에 따른 많은 후보물질 실험 테스트
- 소재특성 계산·예측 정확도를 높여 시간과 비용을 절감하기 위한 노력 진행

예시 : 백금을 대체하는 수소 생산반응 촉매 개발



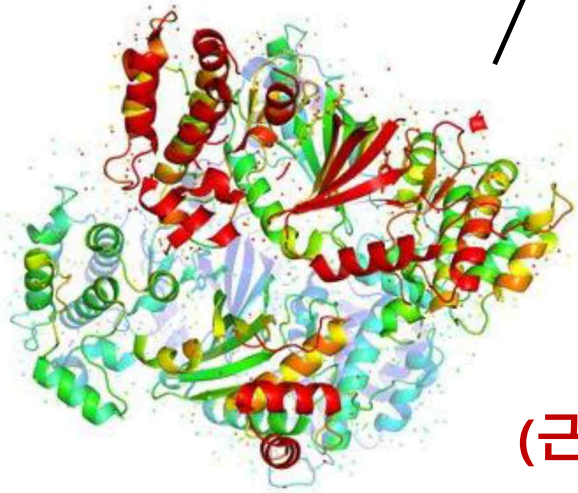
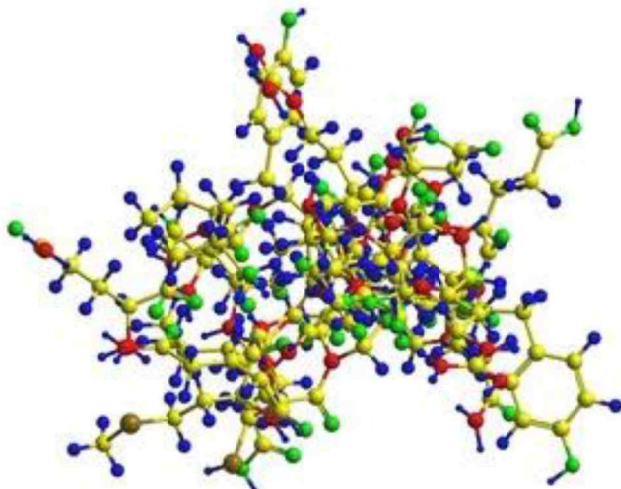
소재특성 예측을 통한 스크리닝



수소 생성 효소의 원리를 활용한 인공 촉매

소재특성 계산·예측의 어려움

양자물리학 법칙의 발견으로 화학/소재의 모든 원리가 밝혀졌고,
남은 것은 큰 규모를 수학적으로 다루는 일 (폴 디랙, 1929)



$H|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle$: 슈뢰딩거 방정식



난제

- 입자간 강한 상호작용 계산 필요
- 슈퍼컴퓨터의 경우, 정확도에 따라

계산 요구량이 기하급수적으로 증가

※ 입자 300개 상호작용 → 10^{90} 비트 필요



(근본적 한계) 계산요구량의 기하급수적 증가로 인해
슈퍼컴퓨터로 계산 불가

아날로그(Analogue) 양자시뮬레이터

- 시뮬레이터

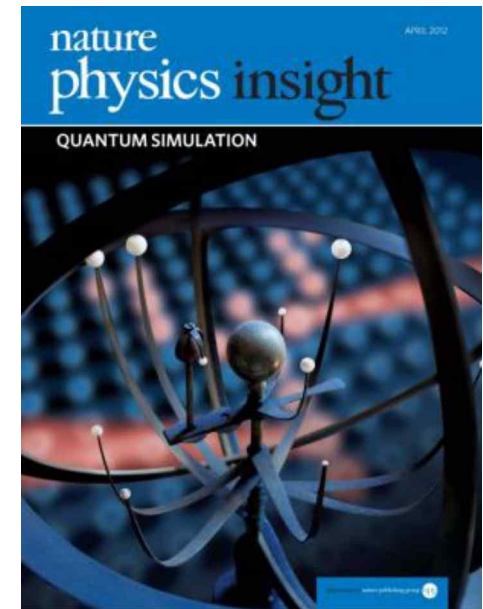
- 실제로 존재하는 세계의 움직임을 해석·예측하기 위해 같은 원리로 동작하도록 설계된 장치

- 양자시뮬레이터

- 특정 양자역학적 현상을 해석·예측하기 위해 같은 원리로 동작하도록 설계된 양자머신
- **(난제해결방안) 슈퍼컴퓨터로 계산 불가능한 소재 특성 예측 및 설계를 양자시뮬레이터로 수행**
- ※ 입자 300개 상호작용 → 300개의 양자입자 (vs 10^{90} 비트)



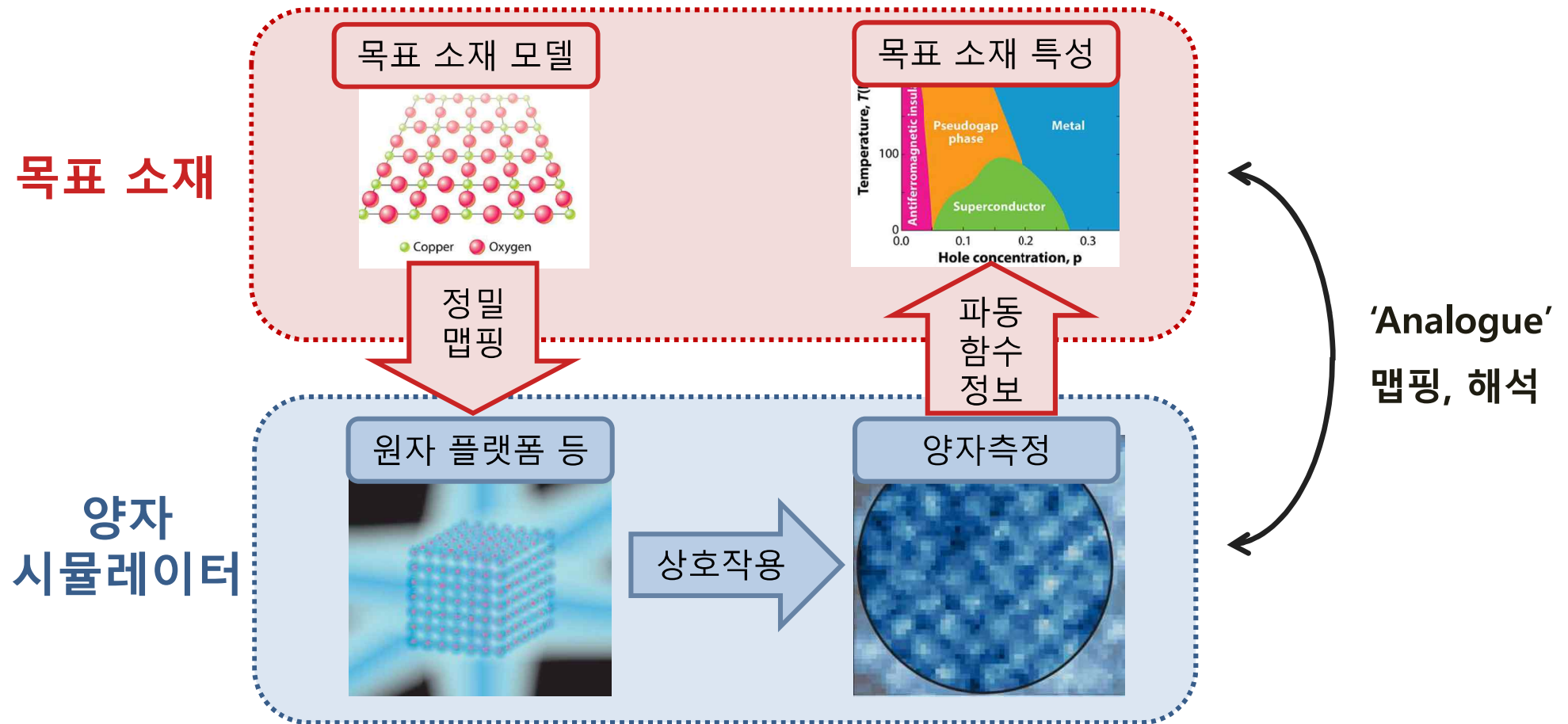
Richard Feynman



Nature Physics 2012

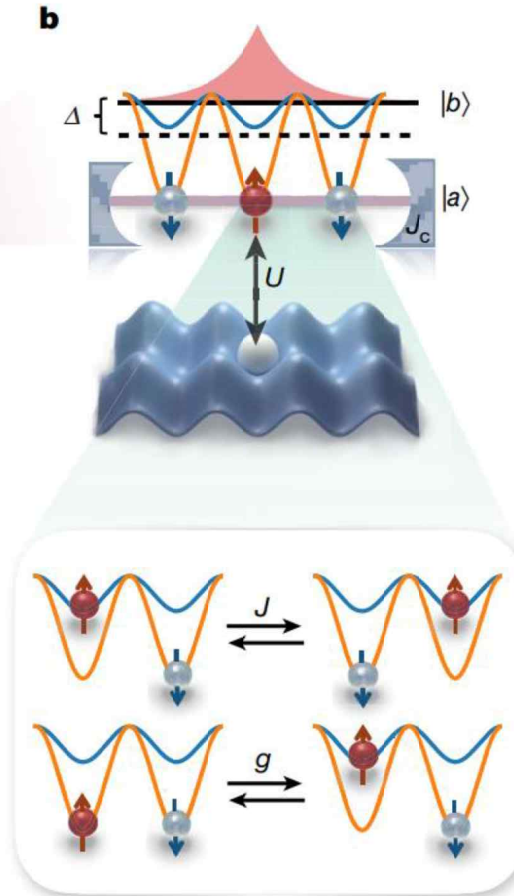
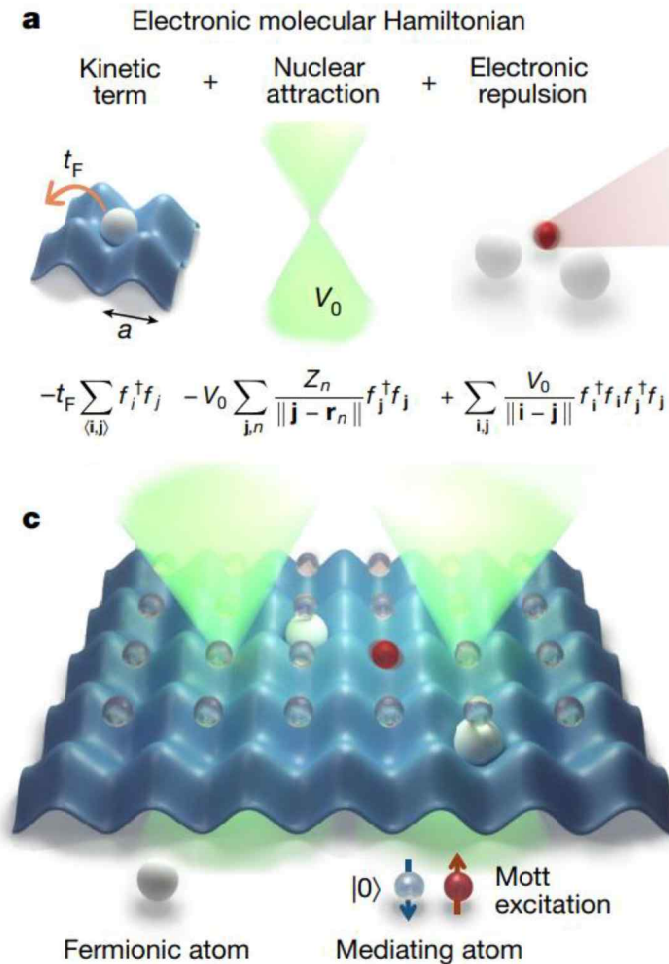
원자기반 아날로그(Analogue) 양자시뮬레이터

- 강한 상관관계 양자입자의 특성 시뮬레이션
 - 허바드 모델 등

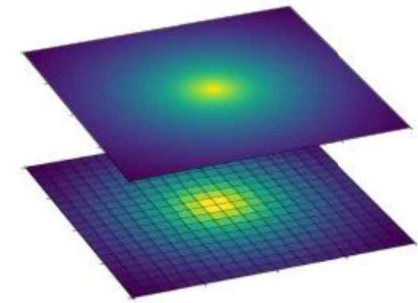
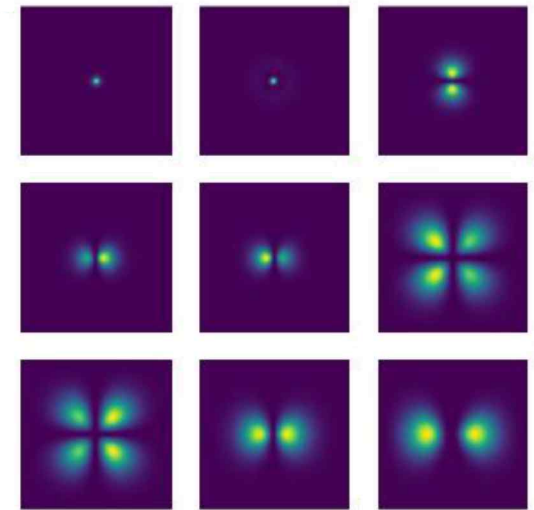


원자기반 아날로그(Analogue) 양자시뮬레이터

- 원자를 이용한 분자 오비탈 시뮬레이션
 - 수소 원자 오비탈 직접 모사

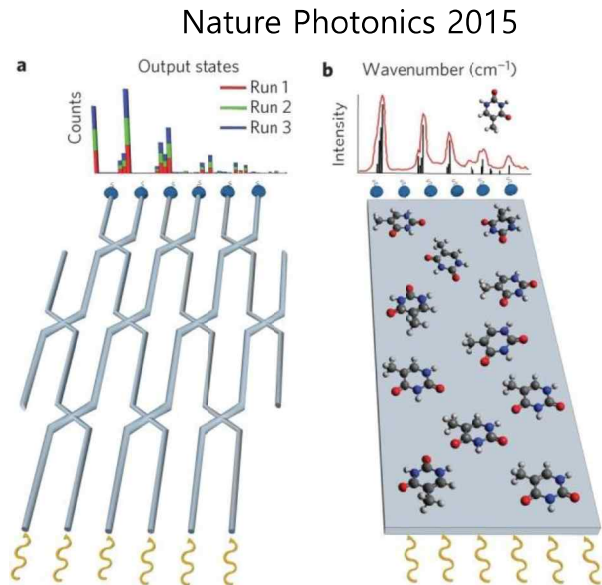


Nature 2019

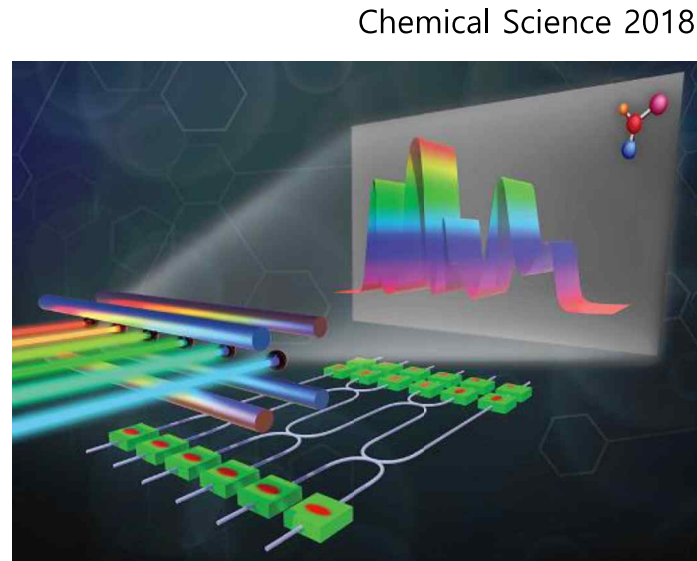


보존샘플링 기반 아날로그(Analogue) 양자시뮬레이터

보존샘플링 데이터 \longleftrightarrow ^{맵핑} 분자 진동 스펙트럼

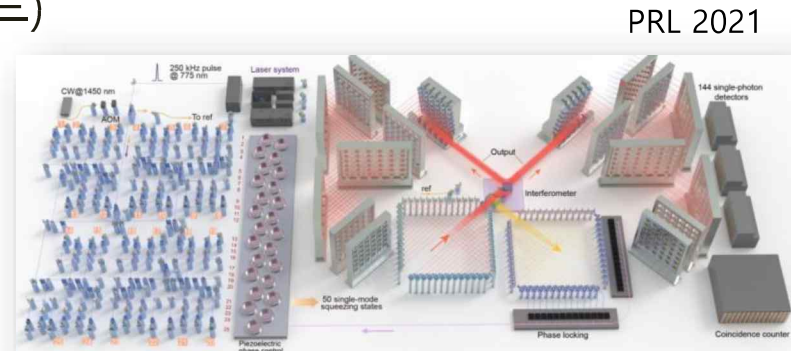


광자기반 보존샘플링



이온트랩기반 보존샘플링

- 보존샘플링 최신 연구 : Quantum beyond classical
 - 가우시안 보존샘플링 (113 광자, 144 모드)
 - 슈퍼컴퓨터 대비 10^{24} 배 빠른 결과

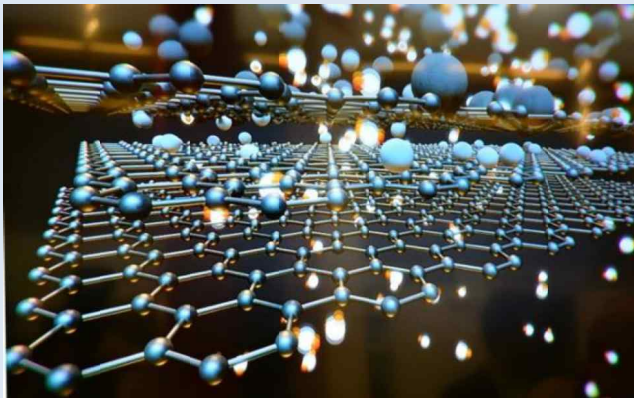


양자컴퓨터를 이용한 양자특성 예측

• 양자컴퓨터

- 큐비트를 정보의 기본 단위로 활용하는 새로운 컴퓨팅 기술
- (응용분야) 암호해독, 데이터 탐색, 머신러닝, **신소재 개발**

소재 : 양자시스템

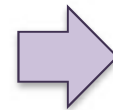


$H|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle$: 슈뢰딩거 방정식



$$H = h_{\alpha}^i \sigma_{\alpha}^i + h_{\alpha\beta}^{ij} \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j + h_{\alpha\beta\gamma}^{ijk} \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j \sigma_{\gamma}^k + \dots$$

σ : 파울리 연산자



맵핑

양자컴퓨터 (디지털 양자시뮬레이터)

$|1\rangle |0\rangle |1\rangle |0\rangle |0\rangle$



$\sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j \sigma_{\gamma}^k$: 파울리 연산자

- 슈뢰딩거 방정식을 푸는 대신,
큐비트 상태준비 및 측정으로
해를 구함

Variational quantum eigensolver (VQE)

- 임의의 해밀토니안은 **파울리 연산자의 선형결합**으로 형태로 나타낼 수 있음

$$H = h_{\alpha}^i \sigma_{\alpha}^i + h_{\alpha\beta}^{ij} \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j + h_{\alpha\beta\gamma}^{ijk} \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j \sigma_{\gamma}^k + \dots$$

- h : 계수, σ^j : 파울리 연산자

→ 에너지 기댓값 : $\langle H \rangle = h_{\alpha}^i \langle \sigma_{\alpha}^i \rangle + h_{\alpha\beta}^{ij} \langle \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j \rangle + h_{\alpha\beta\gamma}^{ijk} \langle \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j \sigma_{\gamma}^k \rangle + \dots$

Easy for a quantum computer

$$\langle \sigma_{\alpha}^i \sigma_{\beta}^j \sigma_{\gamma}^k \dots \rangle$$



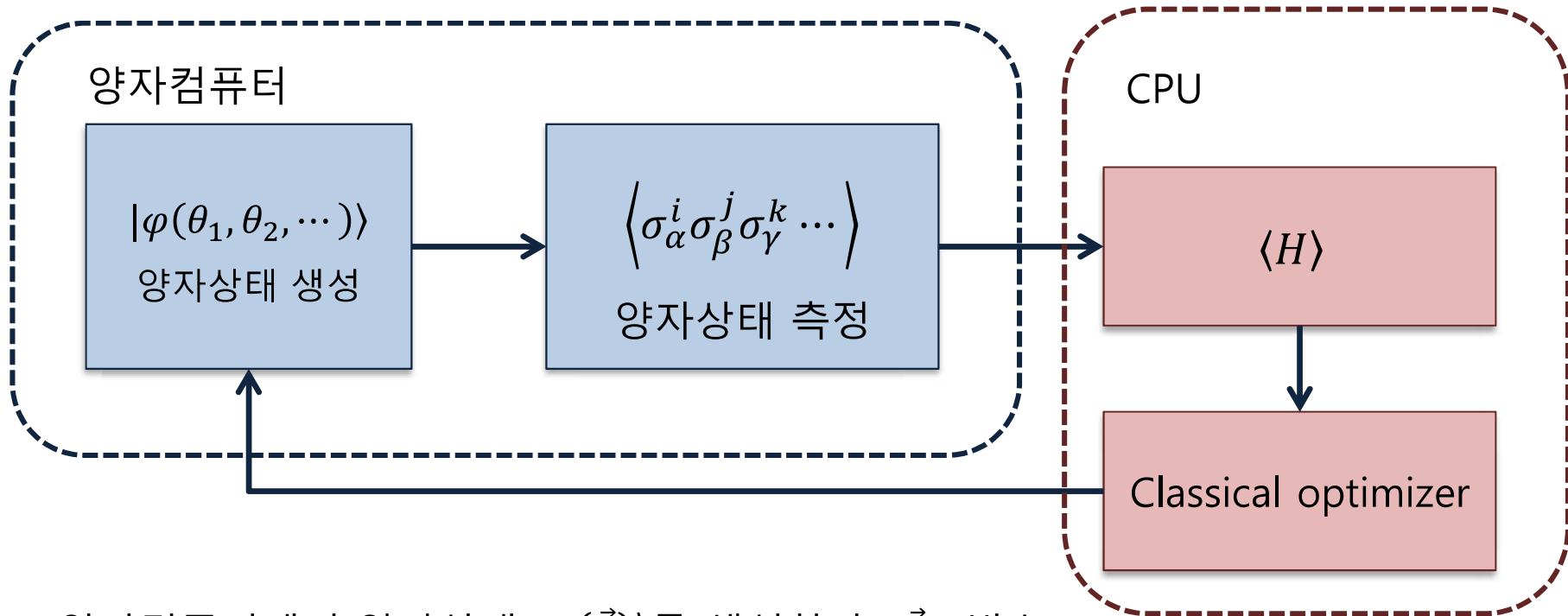
Easy for a classical computer

$+, \times$

에너지 기댓값 $\langle H \rangle$: 계산 대신 측정을 통해 에너지 기댓값을 구함.

Variational quantum eigensolver (VQE)

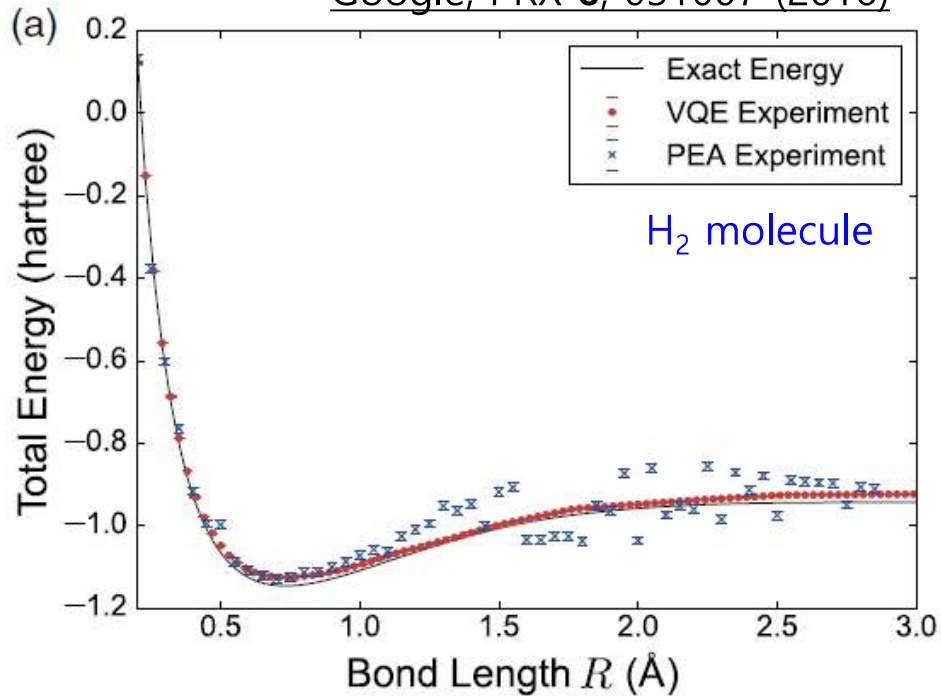
- '양자-고전 하이브리드' 컴퓨팅 모델



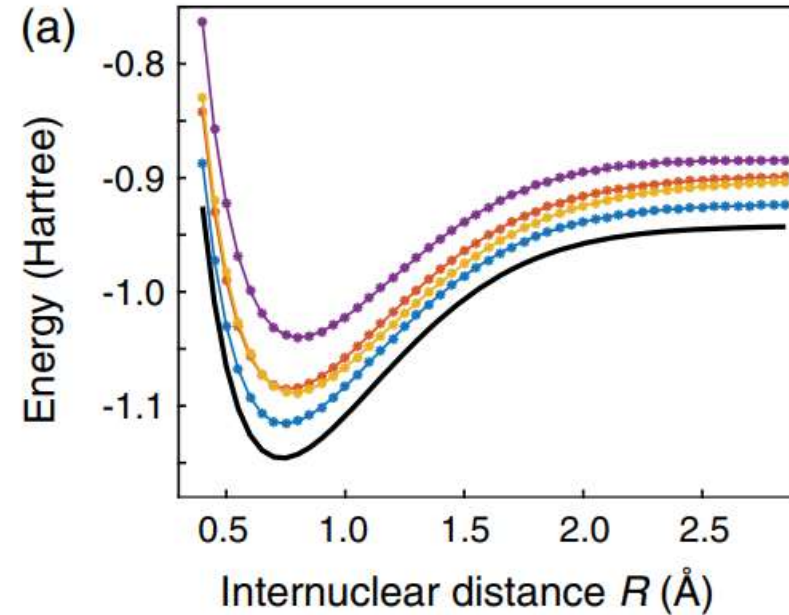
1. 양자컴퓨터에서 양자상태 $|\varphi(\vec{\theta})\rangle$ 를 생성한다. ($\vec{\theta}$: 변수)
2. 파울리 양자측정을 통해 에너지의 기댓값 $\langle H \rangle_{\vec{\theta}}$ 를 구한다.
3. 최적화 연산 (머신러닝 등)을 통해 새로운 변수 $\vec{\theta}$ 를 구한다.
4. 새로운 변수 $\vec{\theta}$ 를 이용해 새로운 양자상태를 생성하고, 에너지 기댓값을 구한다.
5. 에너지 기댓값이 최솟값에 수렴할 때까지 위 과정을 반복한다.

VQE experiments 1

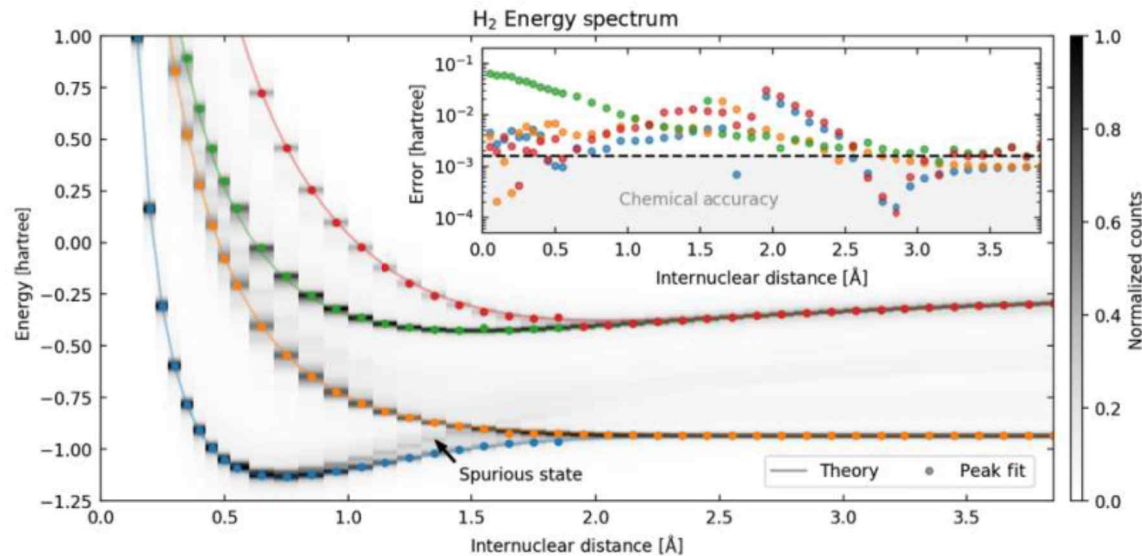
Google, PRX **6**, 031007 (2016)



Insbruck, PRX **8**, 031022 (2018)



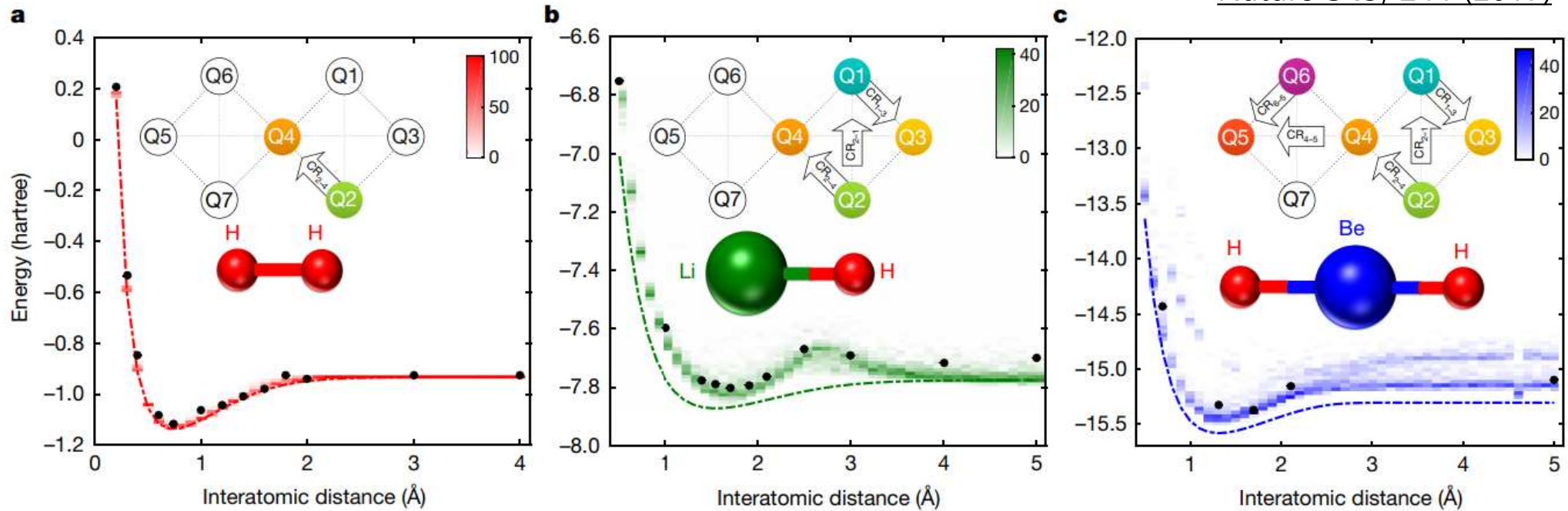
UC Berkeley, PRX **8**, 011021 (2018)



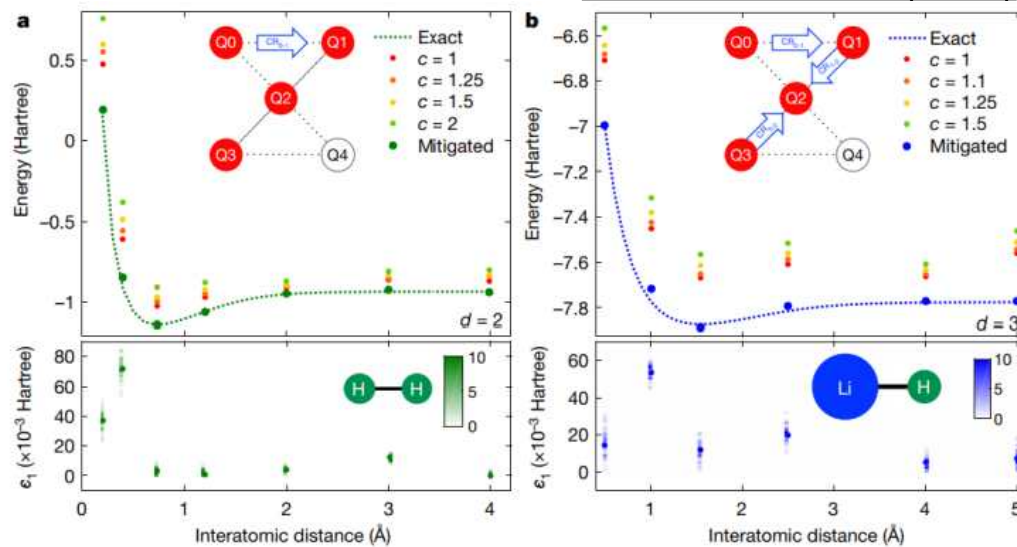
H₂ molecule
ground and excited energies

VQE experiments 2 (IBM)

Nature **549**, 244 (2017)



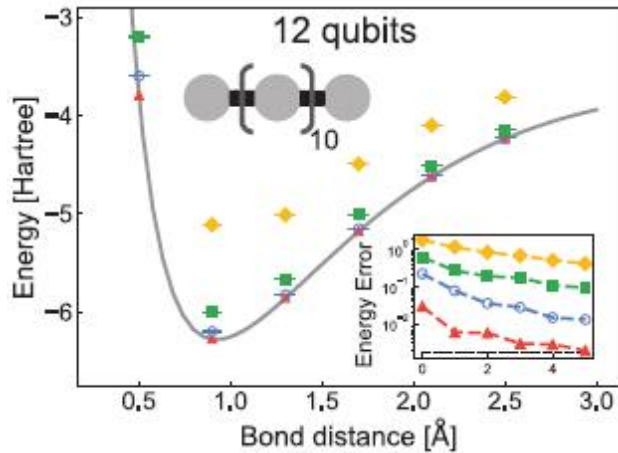
Nature **567**, 494 (2019)



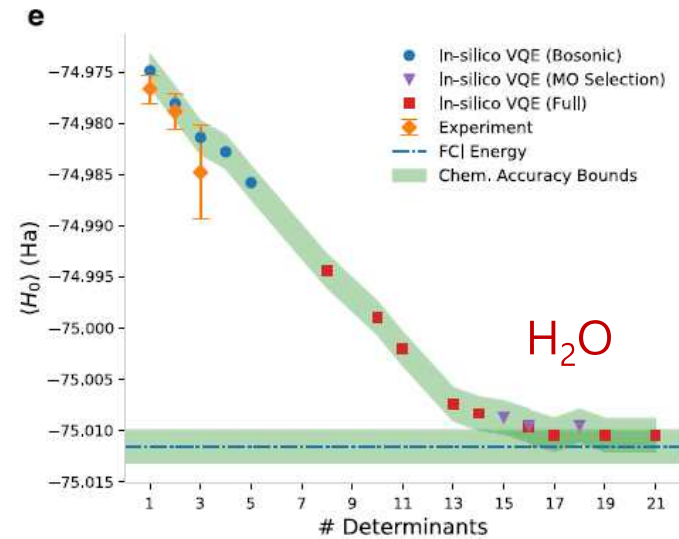
+ 양자오류 보정

VQE experiments 3

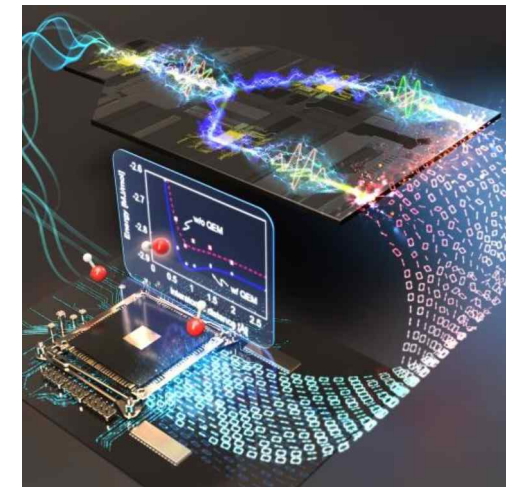
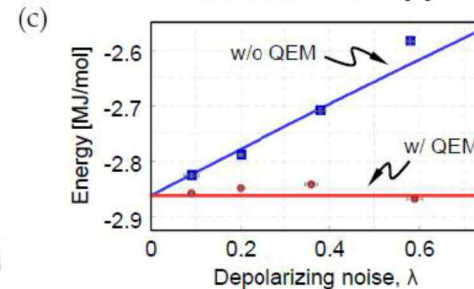
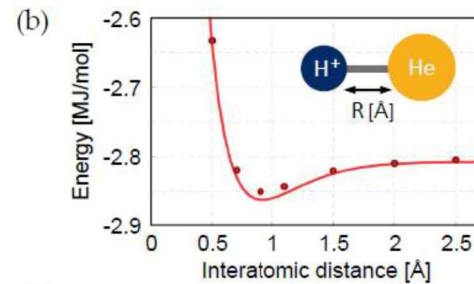
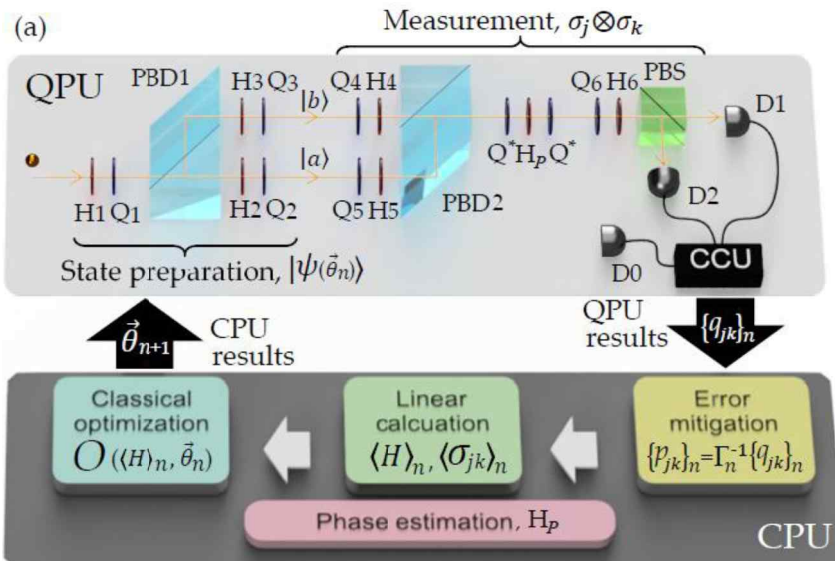
Google, Science **369**, 1084 (2020)



IonQ, npj Quantum Info. **6**, 33 (2020)

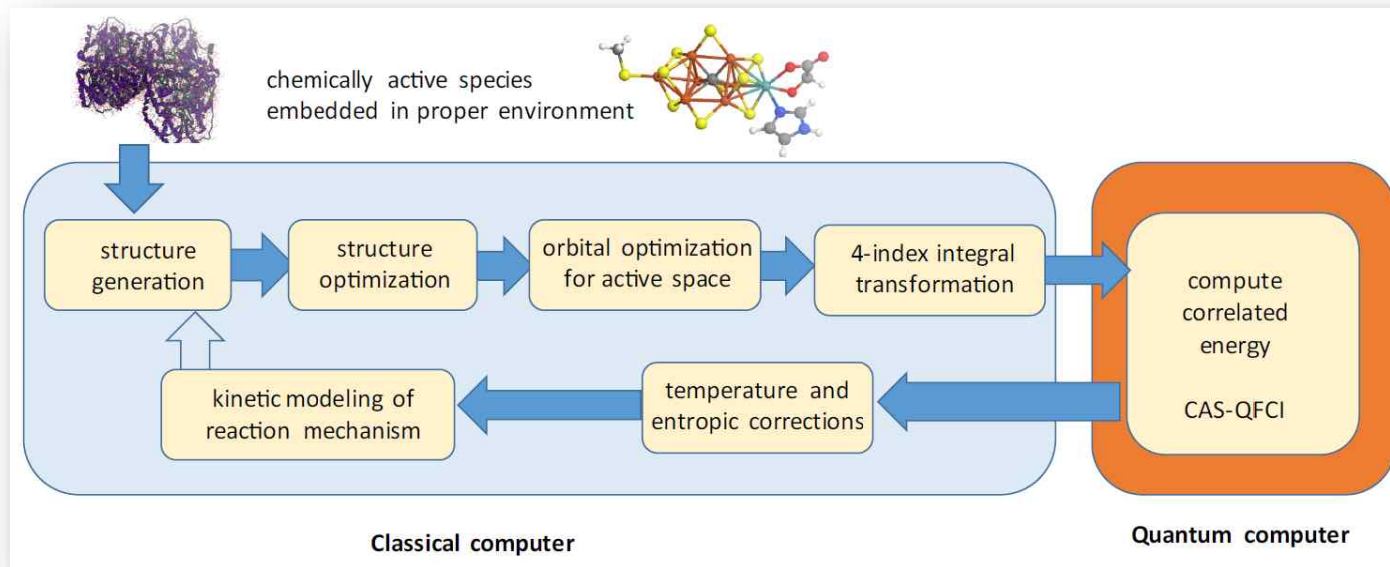


KIST, arXiv:2109.14244, to be appeared in Optica



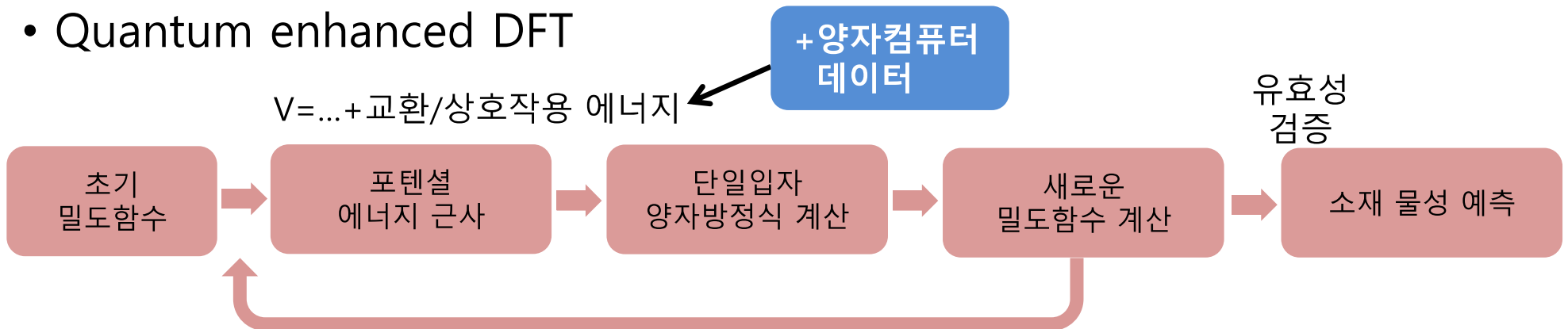
양자컴퓨터의 소재응용 적용 예시

- 양자컴퓨터를 이용한 질소고정 촉매 특성 분석 제안 [PNAS **114**, 7555 (2017)]



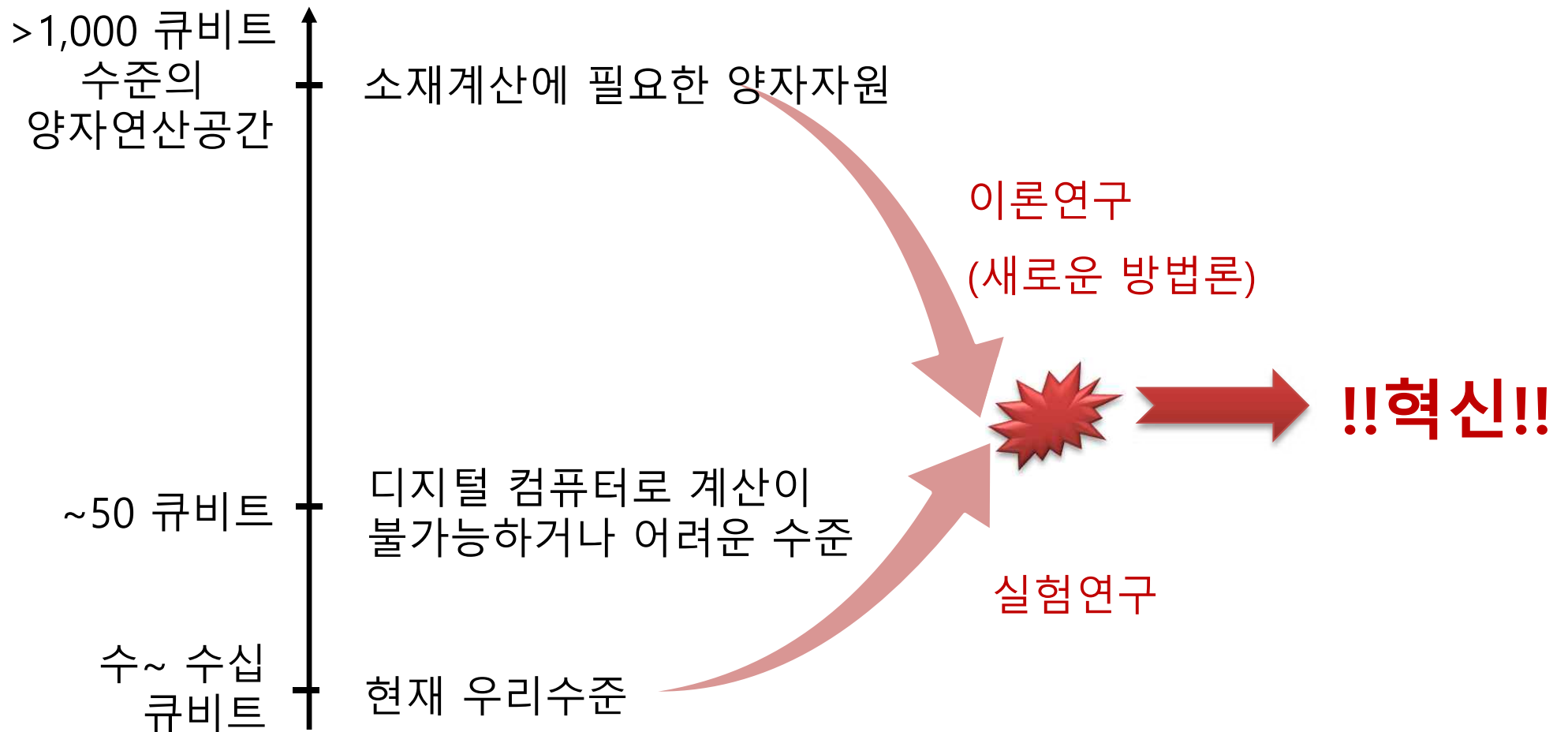
Structure	Qubits
Quantitatively	
Structure 1	
Serial	111
Nesting	135
PAR	1,982
Structure 2	
Serial	117
Nesting	142
PAR	2,024

- Quantum enhanced DFT



신소재 개발에 적용하기 위한 양자컴퓨터 요구조건

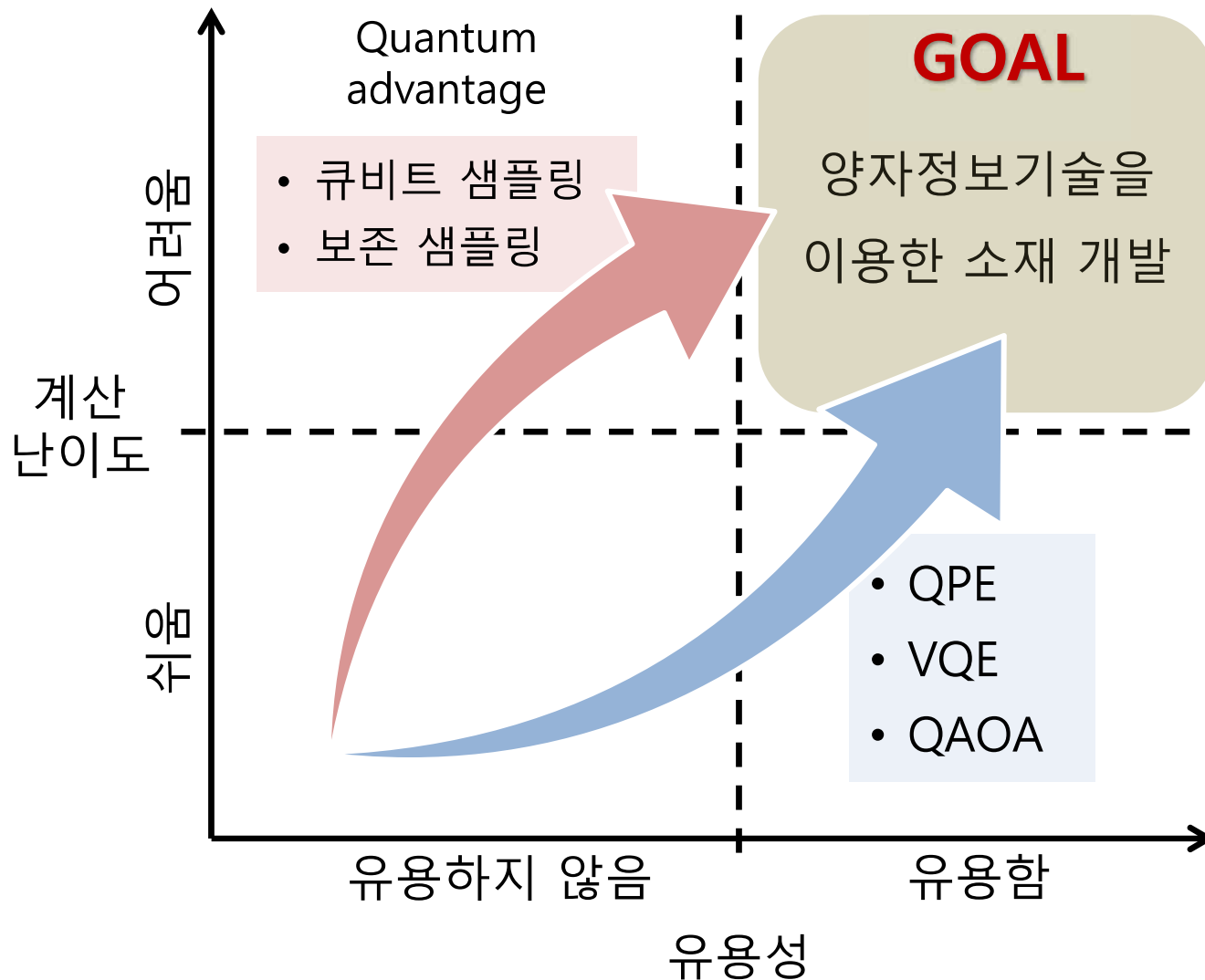
- 신소재 개발 응용을 위해서 얼마나 큰 양자시스템이 필요할까?
 - 이것도 연구주제!!



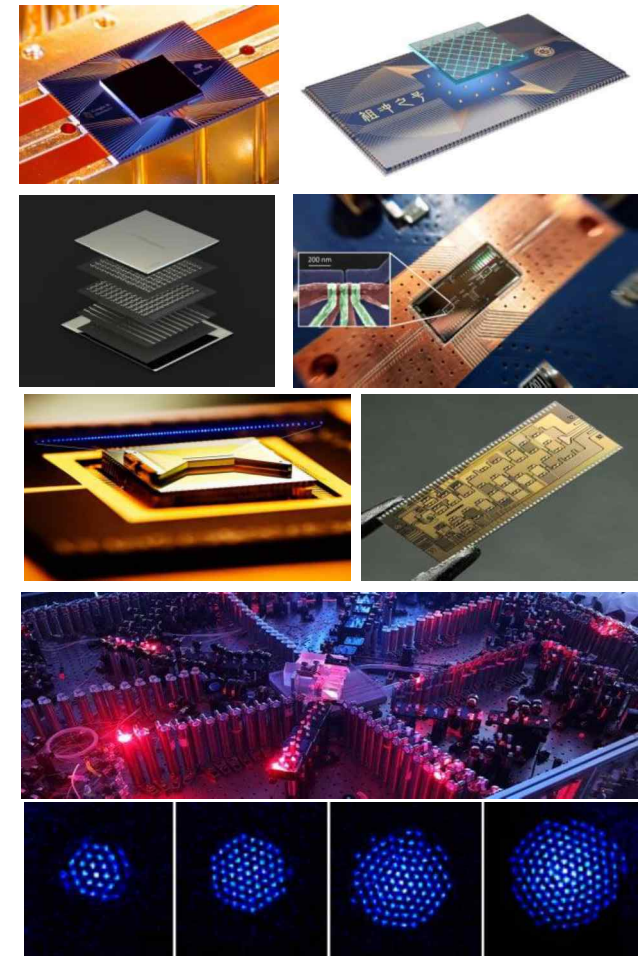
(Summary) 양자시스템을 이용한 신소재 개발

	아날로그 (Analogue) 양자시뮬레이터	큐비트 기반 양자컴퓨터
특징	소재의 물리 모델에 대응하는 양자 시스템을 구성하여, 궁금한 물성을 직접 모사	양자상태 에너지 기댓값을 계산하지 않고, 큐비트 측정을 통해 구함.
장점	양자입자 개수가 커 다체계 물질계산에 적합 (양자우월성 달성)	기존 계산 방법론과 호환성이 우수하여 다양한 소재개발에 적용 가능함
단점	1:1 맵핑이 가능한 소재에만 적용할 수 있어, 응용분야가 다소 제한적임	기술적 난이도가 높음
주요 연구팀	Harvard, Max Planck Institute, USTC (중국과기대) 등	구글, IBM, IonQ, Xanadu 등

Where we are? Where we have to go?



양자시스템 하드웨어



감사합니다.

양자기술로 세상을 바꾸겠습니다.



Prof. Markus Reiher (ETH Zurich)

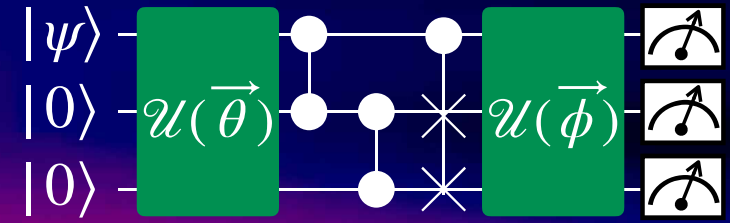
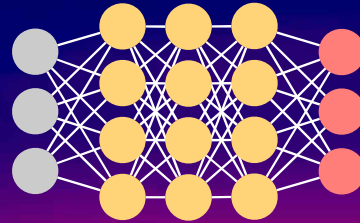
양자컴퓨터/시뮬레이터가 언제 실용화될지는 아무도 모른다. 하지만, 그 때가 오면 나와 내 그룹 전체 연구 방향을 바꿀 것이다.

- APS와의 인터뷰에서 (2019)

[발표 4]

양자 컴퓨터와 머신러닝

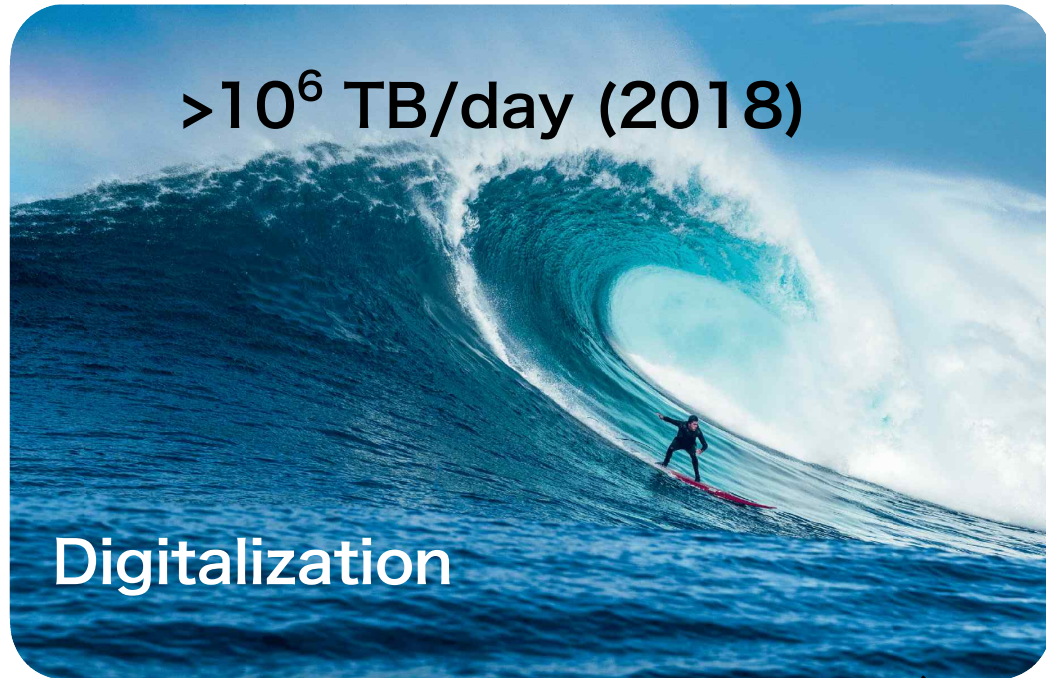
- 박경덕 교수(성균관대학교) -



양자 컴퓨터와 머신러닝

박경덕 (Daniel K. Park)

Surfing the Waves of Big Data



Computational Power: Algorithms & Hardware
↳ Limited by the laws of physics

Surfing the Waves of Big Data

$>10^6$ TB/day (2018)

Digitalization



Computational Power: Algorithms & Hardware
↳ Limited by the laws of physics

Quantum Computing + Machine Learning

IBM

aws



nVIDIA®

Honeywell



Alibaba.com™

D:WAVE
The Quantum Computing Company™

XANADU



Google AI

Microsoft

IONQ

QCWARE

ZAPATA

Cambridge
Quantum
Computing

rigetti

Quantum Computing + Machine Learning

IBM

aws



NVIDIA®

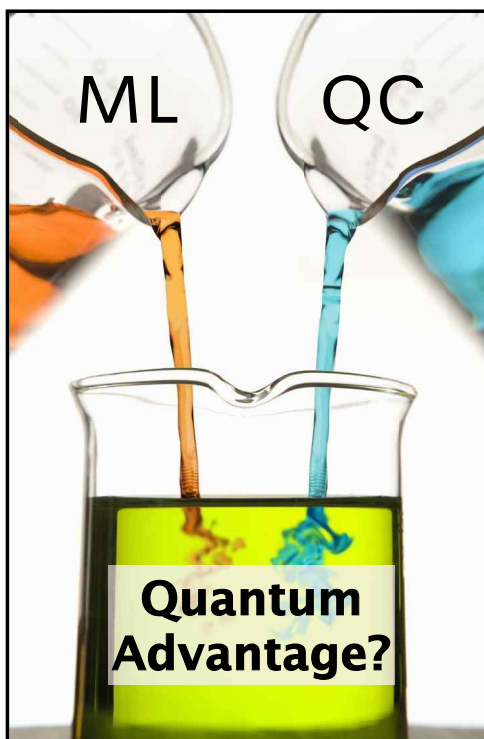
Honeywell



Alibaba.com™

D:WAVE
The Quantum Computing Company™

XANADU



Google AI

Microsoft

IONQ

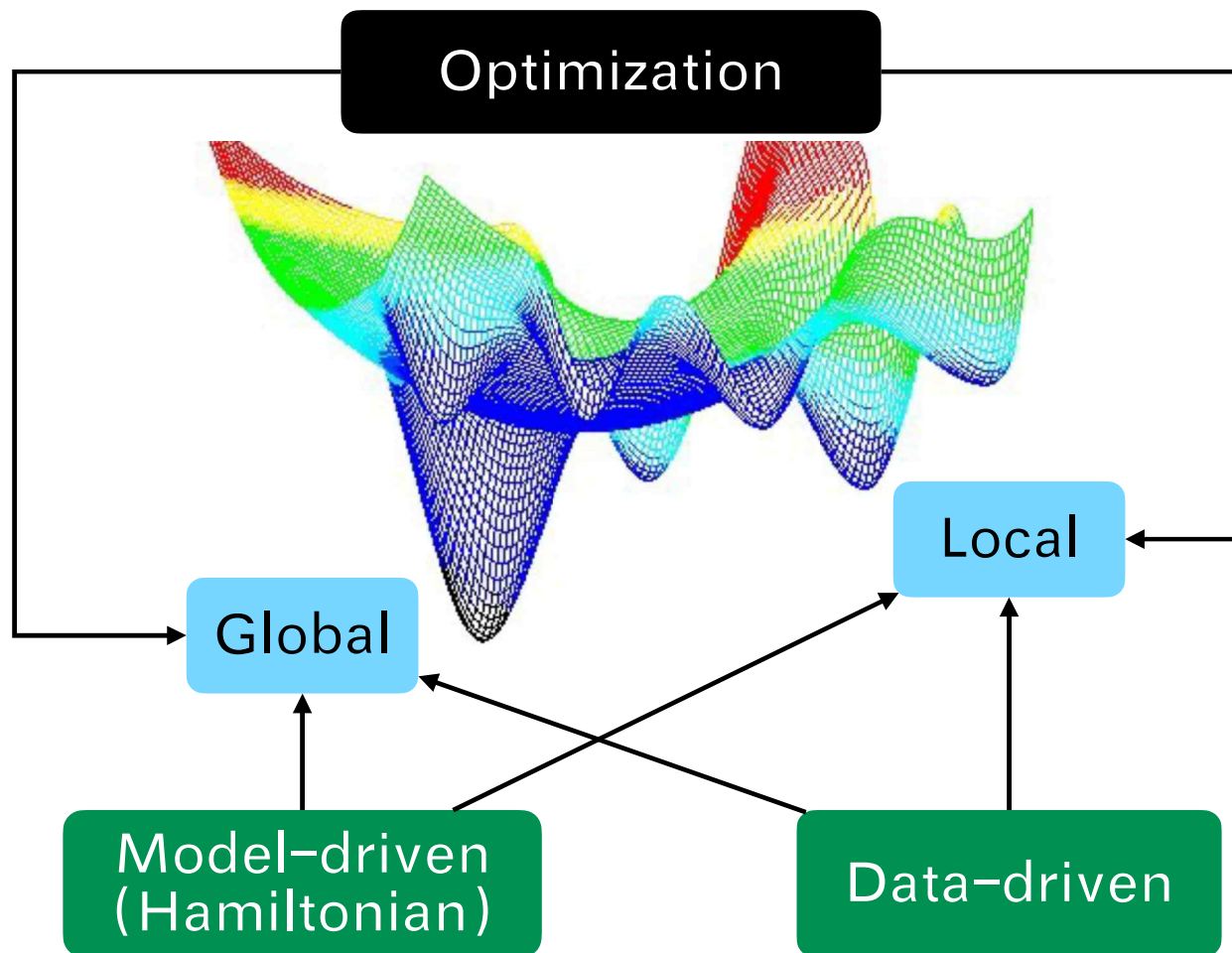
QCWARE

ZAPATA

Cambridge
Quantum
Computing

rigetti

What Do Quantum Computers Solve?



What Do Quantum Computers Solve?

Optimization

“Near-term Quantum Computers will be too big and too small”

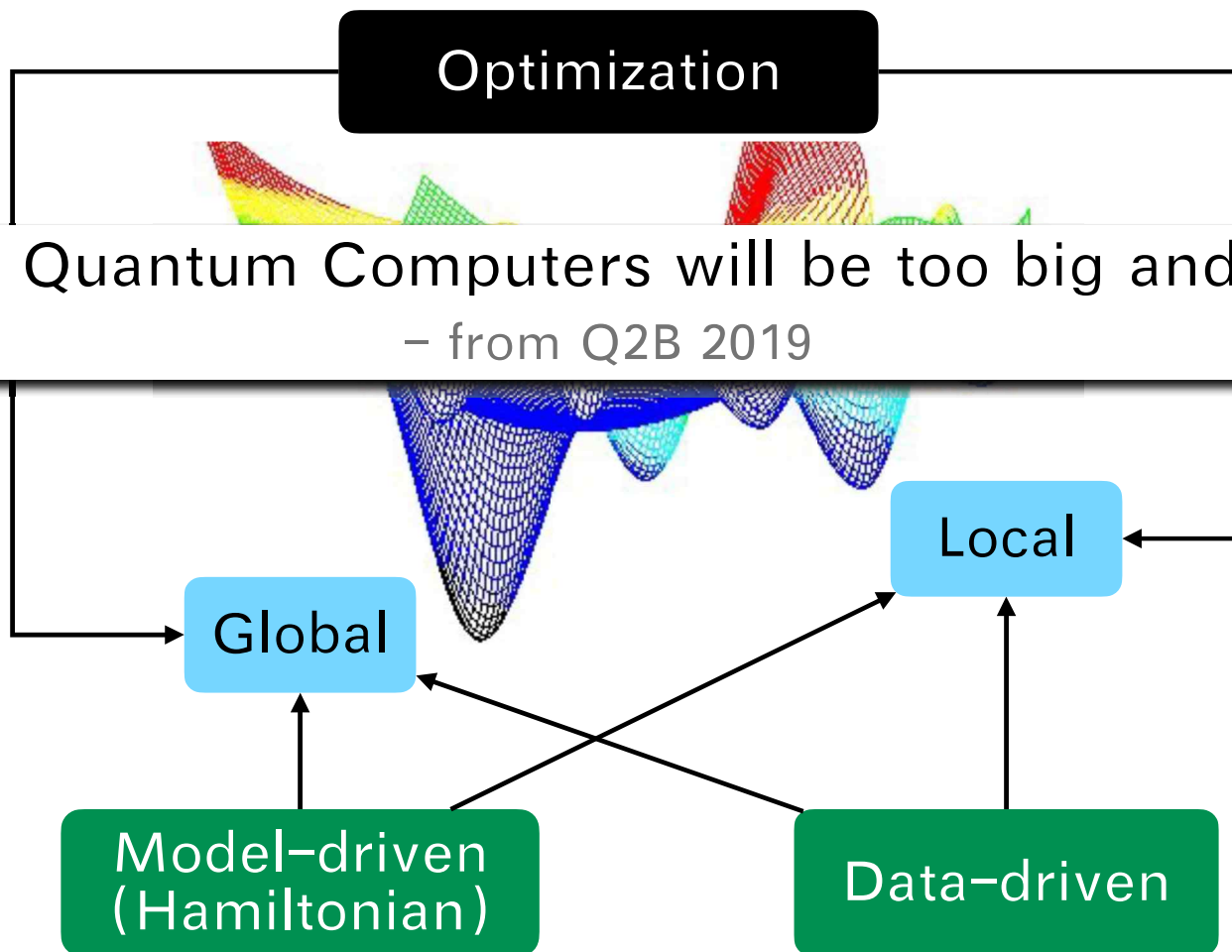
– from Q2B 2019

Global

Local

Model-driven
(Hamiltonian)

Data-driven



What Do Quantum Computers Solve?

Optimization

“Near-term Quantum Computers will be too big and too small”

– from Q2B 2019

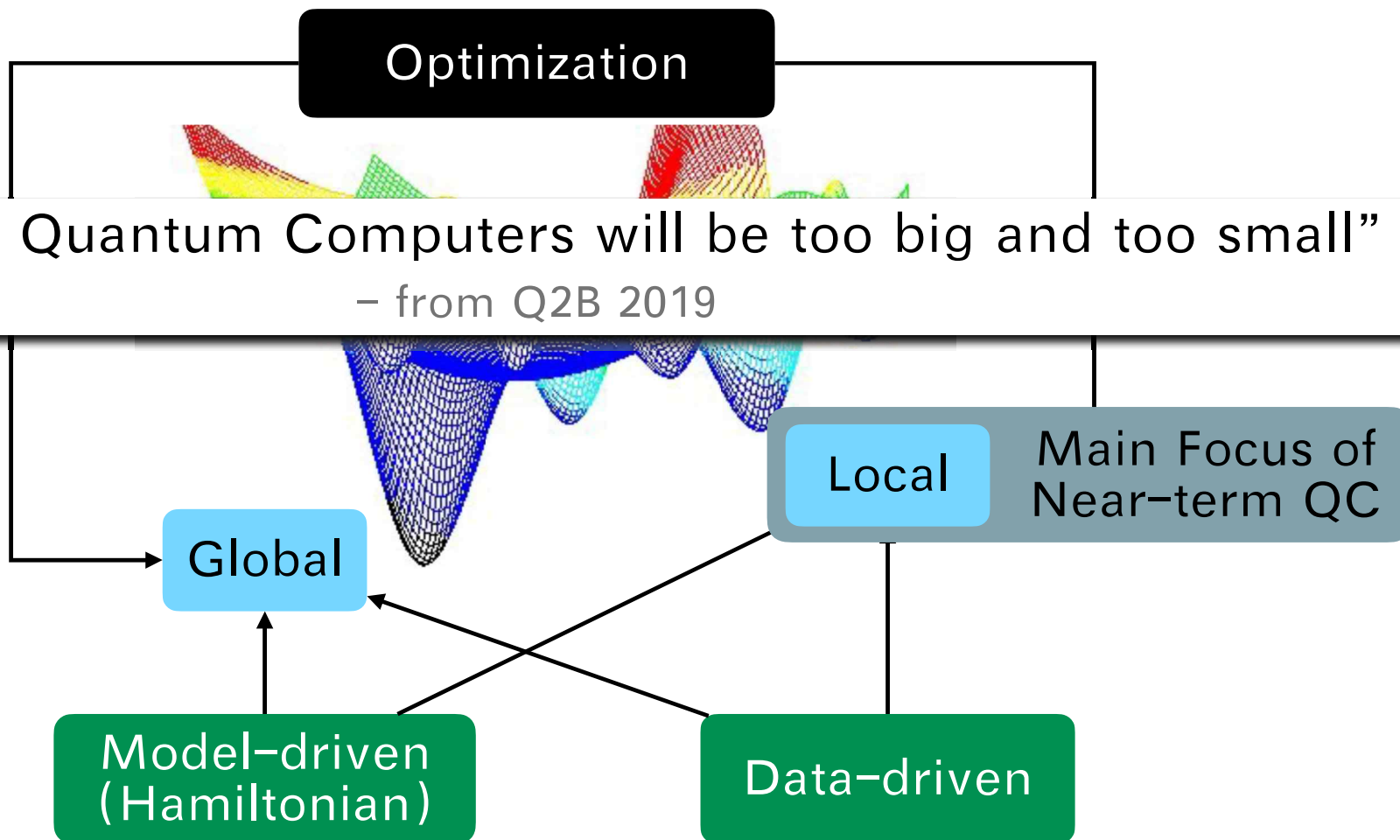
Local

Main Focus of
Near-term QC

Global

Model-driven
(Hamiltonian)

Data-driven



Major Streams of QML Research

Long-term: Quantum Linear Algebra

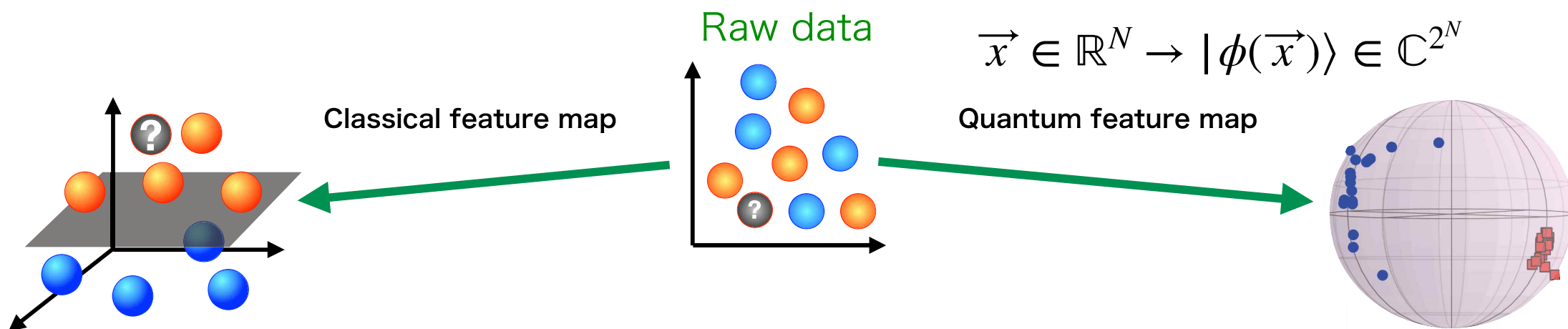
Exponential or polynomial speed-up in

- Support vector machine
- Principle component analysis
- Bayesian methods
- ...

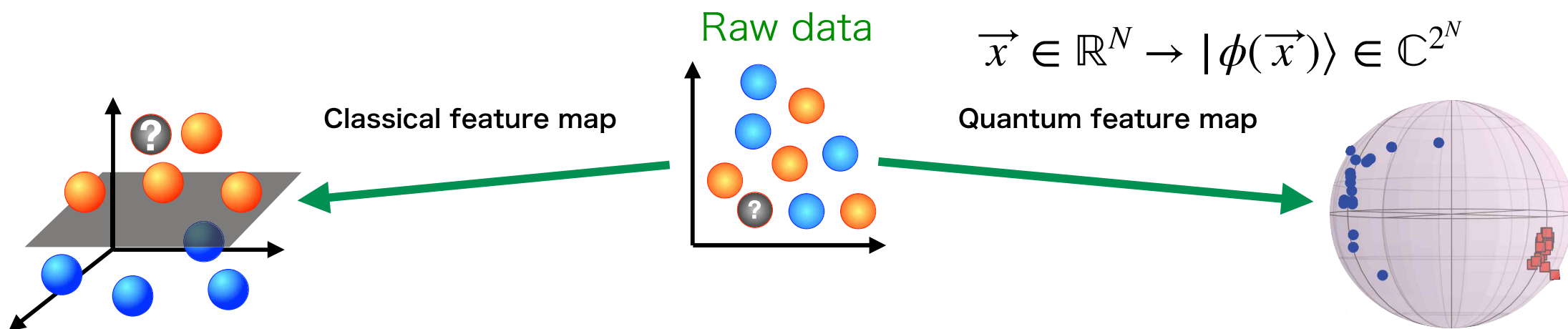
Near-term QML

- Kernel methods
 - Quantum neural network
 - Combinatorial optimization
 - Quantum-inspired classical algorithms
- * Constant improvement can be impactful.

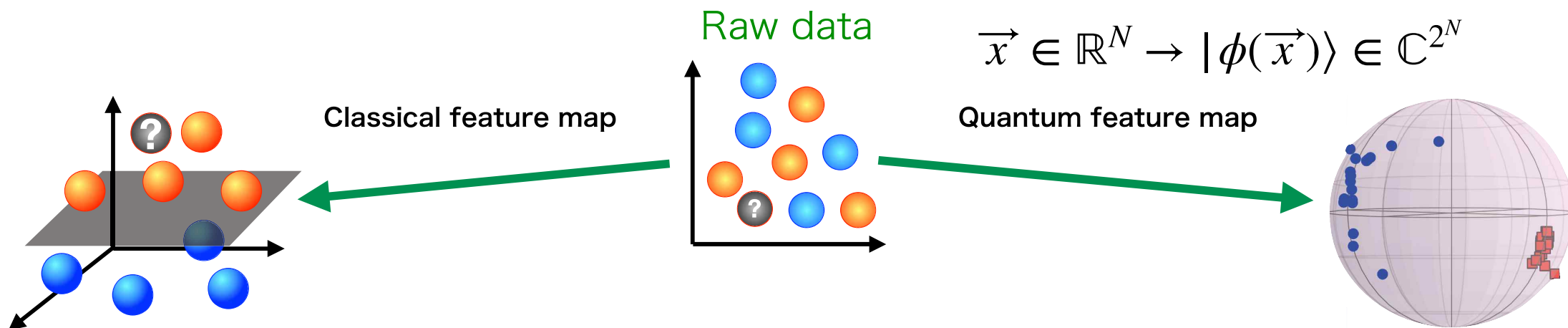
Example 1: Kernel Method for Classification



Example 1: Kernel Method for Classification




Example 1: Kernel Method for Classification



nature
computational
science

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s43588-021-00084-1>

 Check for updates

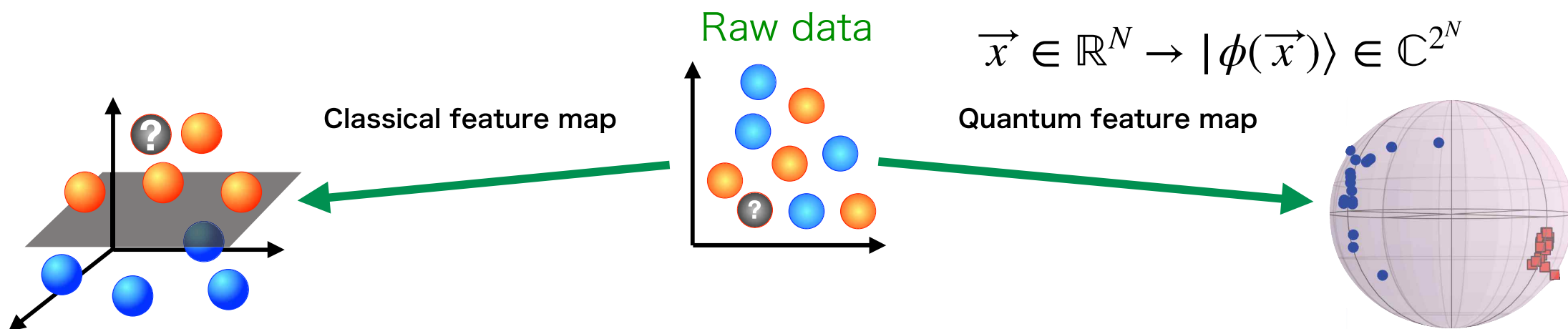
The power of quantum neural networks

Amira Abbas^{1,2}, David Sutter¹, Christa Zoufal^{1,3}, Aurelien Lucchi³, Alessio Figalli³ and Stefan Woerner¹  

Potential Improvement:

- Model capacity/expressibility
- Trainability

Example 1: Kernel Method for Classification



nature
computational
science

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s43588-021-00084-1>

The

nature
COMMUNICATIONS

Amira Ab

Article | [Open Access](#) | [Published: 11 May 2021](#)

Power of data in quantum machine learning

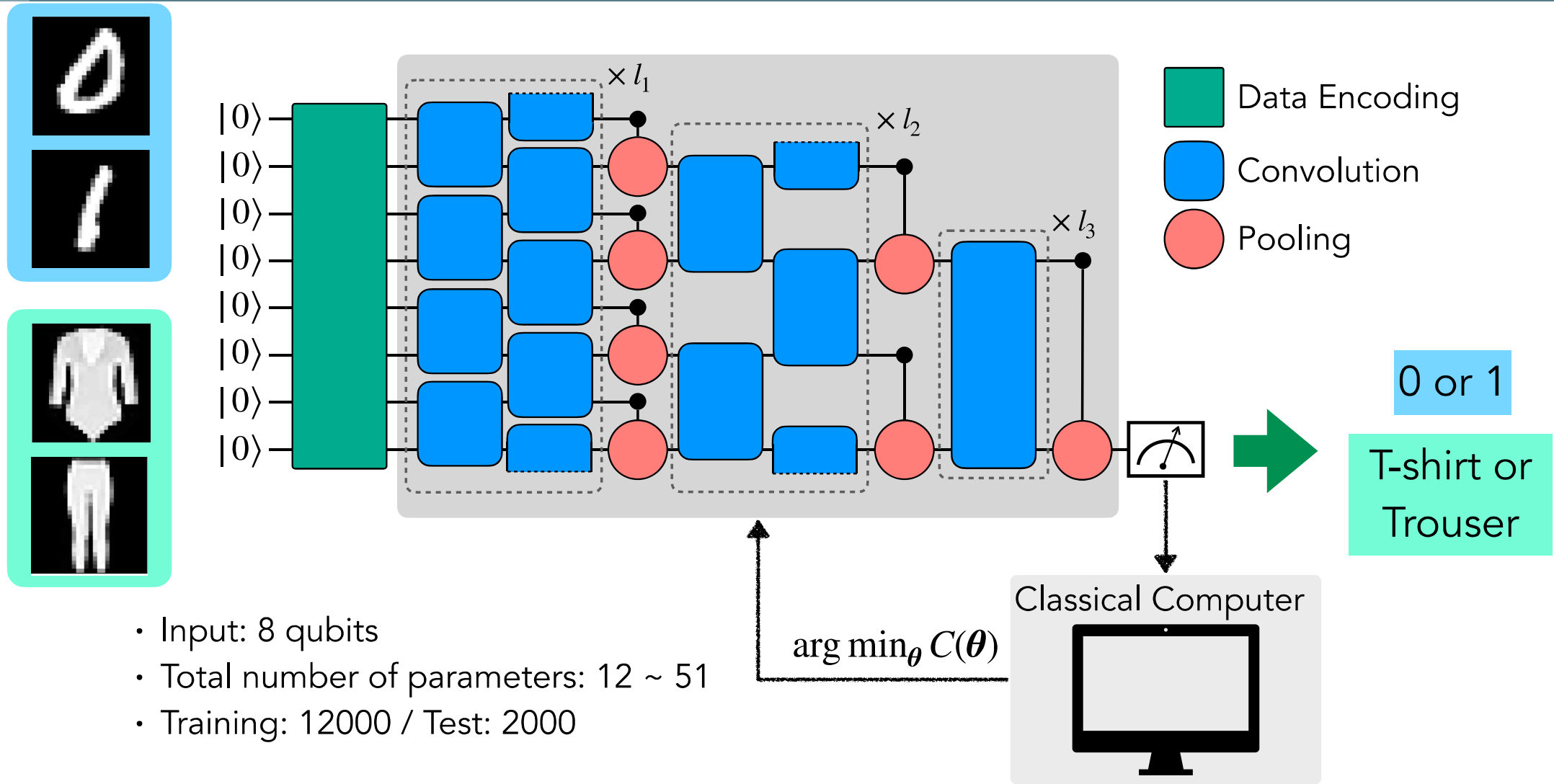
[Hsin-Yuan Huang](#), [Michael Broughton](#), [Masoud Mohseni](#), [Ryan Babbush](#), [Sergio Boixo](#), [Hartmut Neven](#) & [Jarrod R. McClean](#)

Potential Improvement:

- Model capacity/expressibility
- Trainability

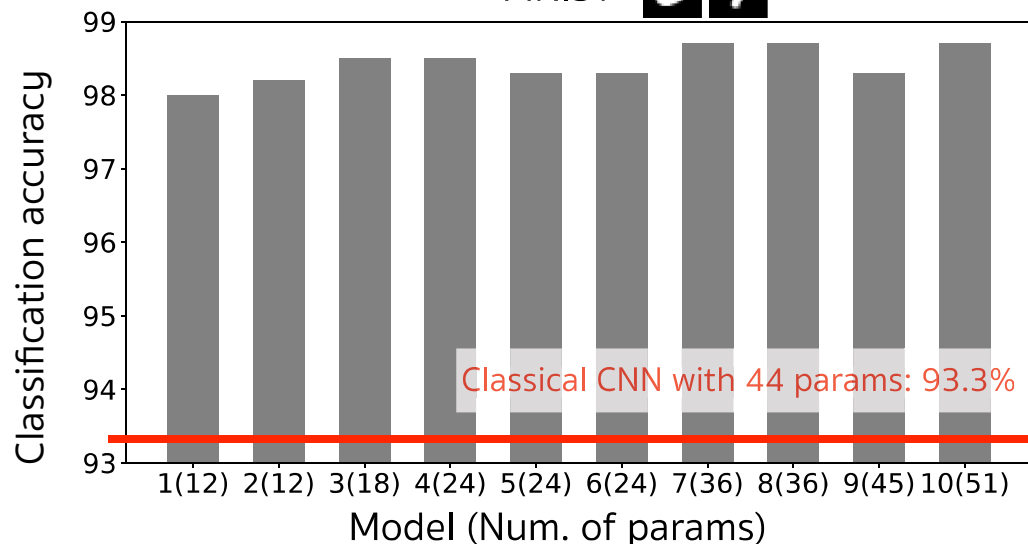
Finding sweet-spot to circumvent the curse of dimensionality

Example 2: Quantum Convolutional Neural Network

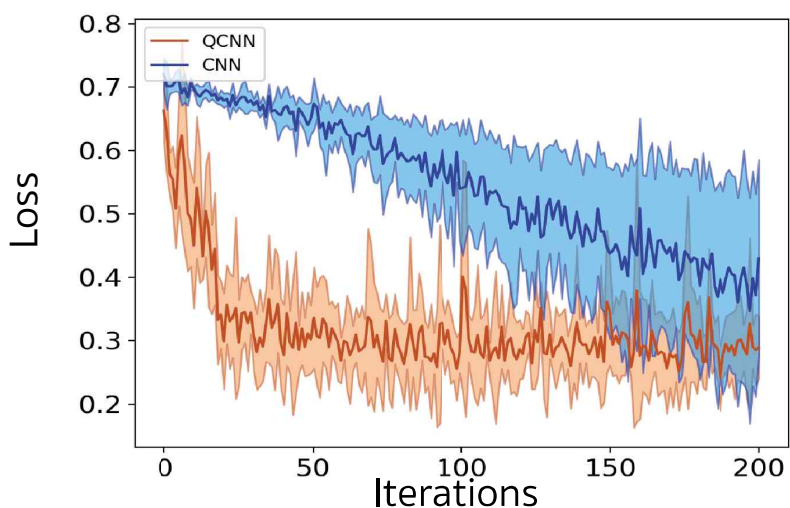
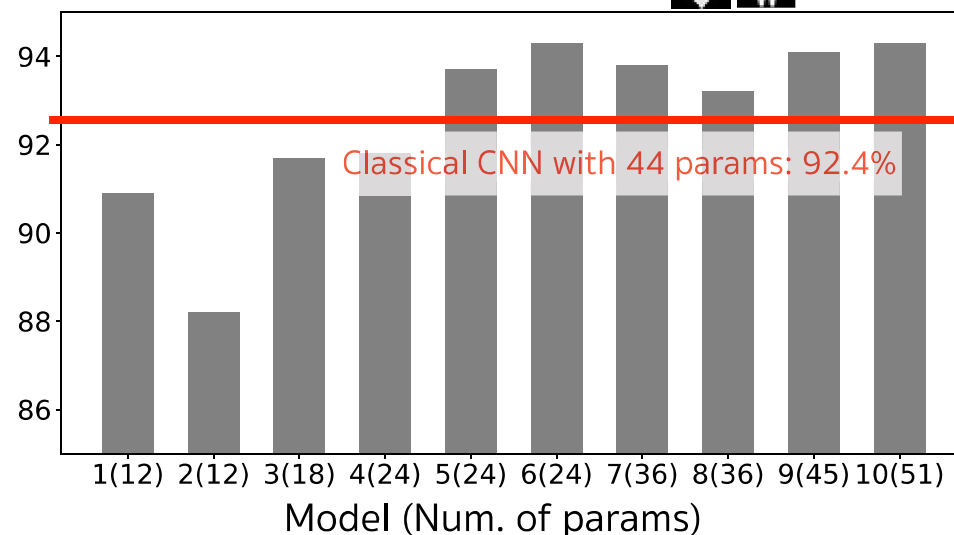


Example 2: Quantum Convolutional Neural Network

MNIST  



Fashion MNIST  



- Trains faster.
- Less sensitive to random initialization.
- Higher accuracy in the few parameter regime.

Example 3: Clustering

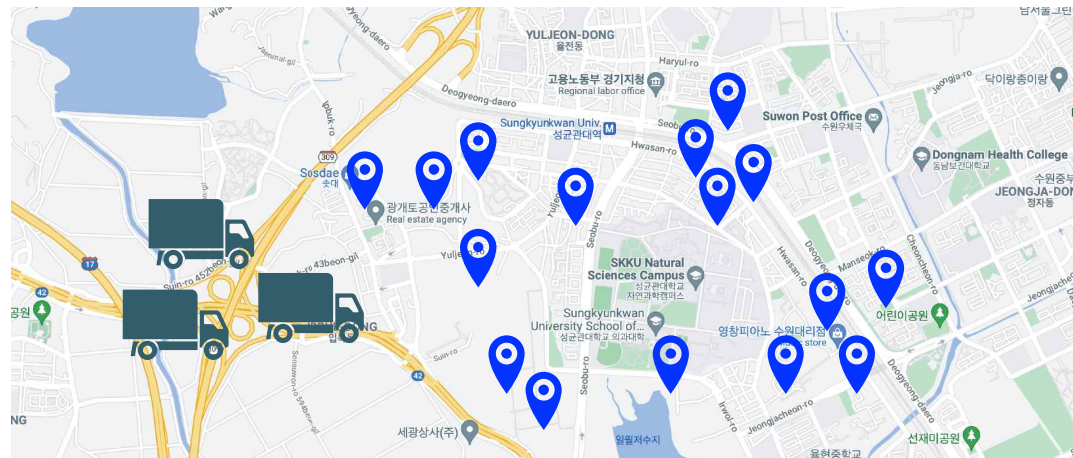
Computer vision: self-driving, medical diagnosis, anomaly detection etc.



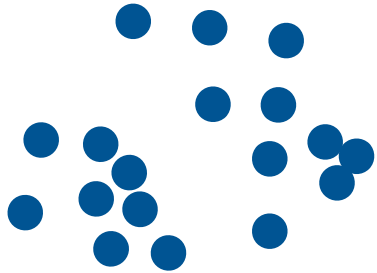
1	1	1	1	4	4	4	8	8	8	8	9
1	1	1	2	4	4	4	8	8	8	8	9
1	2	2	2	4	4	4	8	8	7	7	9
1	2	2	2	4	4	5	5	8	7	7	9
1	1	1	2	4	4	5	5	7	7	7	7
1	1	2	2	3	4	5	5	7	7	7	7
1	1	3	3	3	4	5	6	6	7	7	7
1	1	3	3	3	5	5	6	6	7	7	7
3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6



Logistics

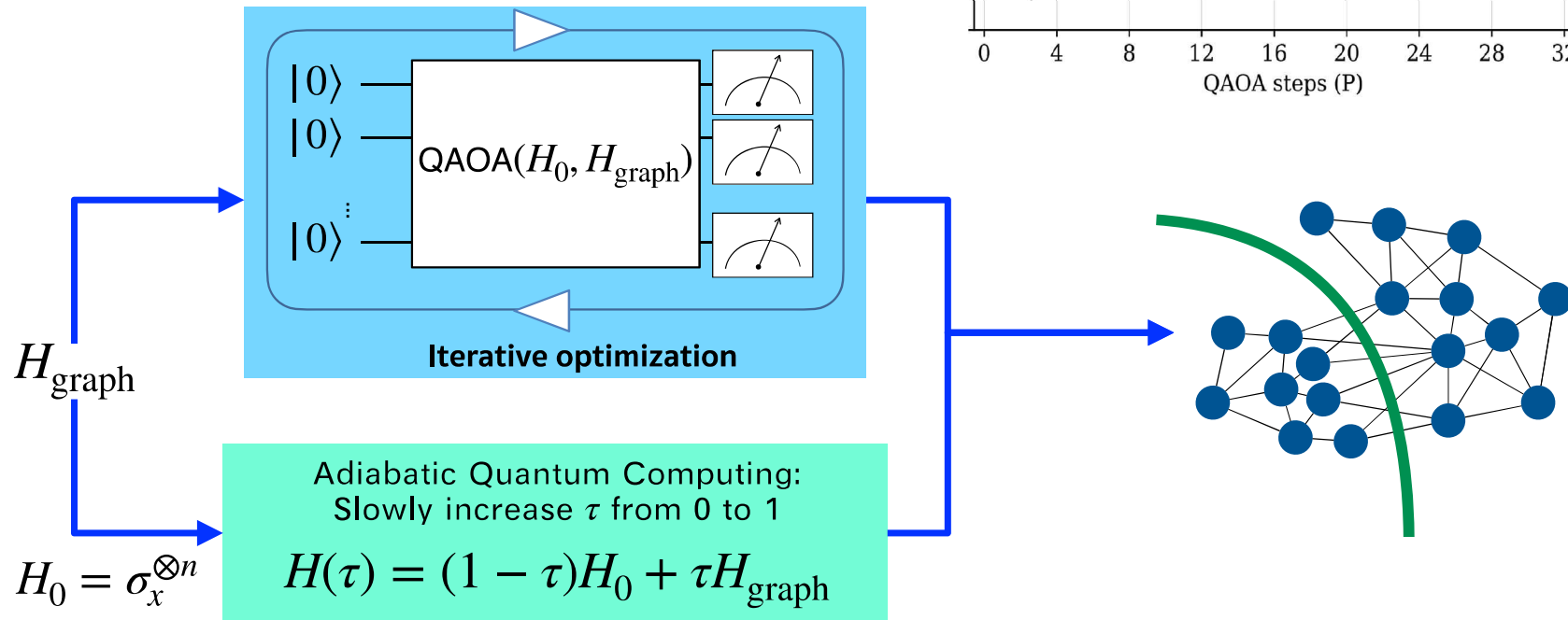
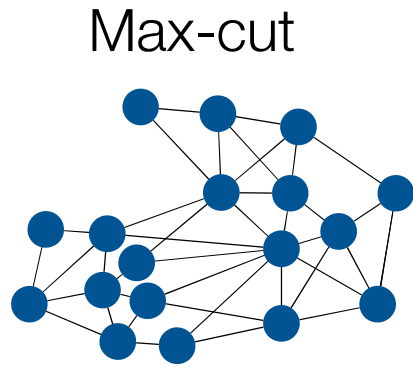
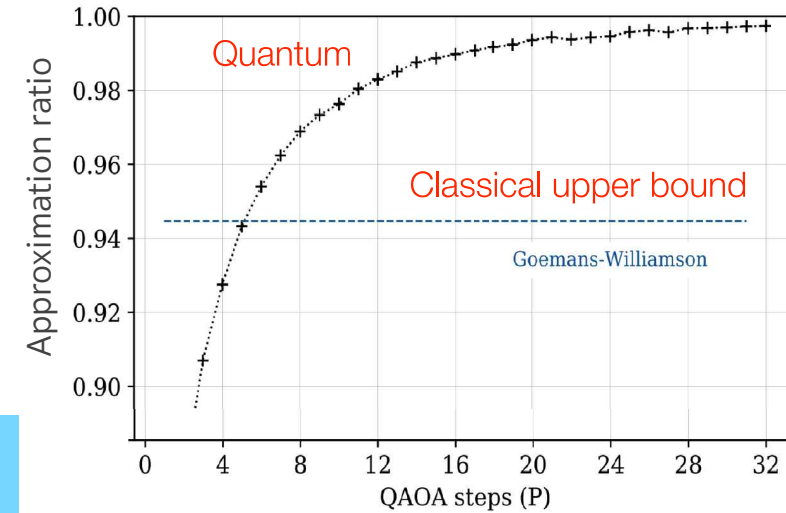


Example 3: Clustering



k clusters

- Combinatorial optimization
- Hamiltonian problem
- Quantum computing!



Open Problems for Near-term QML

- Empirical evidences for advantages of QML → More theory needed
- No free lunch theorem: Identify the right problems for near-term QML
- Kernel methods: Identify the right feature maps
- Quantum neural network: Trainability? Generalization error?
- Classical-Quantum hybrid model: Optimizer robust to quantum noise

Future is Hybrid

Computer vision Bioinformatics Medical diagnosis High energy physics

Logistics

Clustering

Autoencoder

Anomaly detection

Finance

Classification

Dimensionality reduction

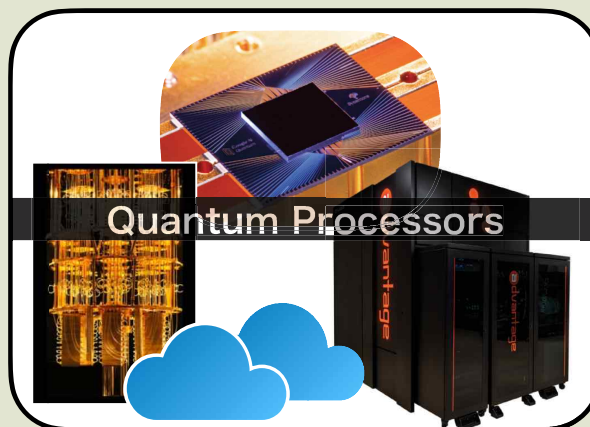
GAN

Neural network

Combinatorial optimization

Kernel method

Monte Carlo



양자기술 산·학·연·관 교류·소통의 場

제1차 K-퀀텀 스퀘어 미팅

주최 : 과학기술정보통신부 주관: 한국연구재단, 양자정보연구지원센터

K-QUANTUM